

Titre: Commande d'un dispositif de stockage d'énergie par chaîne de supercondensateurs avec raccordement direct sur réseau CA et/ou CD
Title:

Auteur: Lucile Moret
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Moret, L. (2017). Commande d'un dispositif de stockage d'énergie par chaîne de supercondensateurs avec raccordement direct sur réseau CA et/ou CD [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/2727/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2727/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Frédéric Sirois
Advisors:

Programme: génie électrique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

COMMANDE D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHAÎNE DE
SUPERCONDENSATEURS AVEC RACCORDEMENT DIRECT SUR RÉSEAU CA
ET/OU CC

LUCILE MORET
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
AOÛT 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

COMMANDE D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHAÎNE DE
SUPERCONDENSATEURS AVEC RACCORDEMENT DIRECT SUR RÉSEAU CA
ET/OU CC

présenté par : MORET Lucile

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BRAULT Jean-Jules , Ph. D., président

M. SIROIS Frédéric, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. APRIL Georges-Émile, M. Sc., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche Frédéric Sirois, pour sa disponibilité, ses efforts et sa patience tout au long de ma maîtrise. Il m'a offert des conditions idéales et un support sans faille.

Je souhaite également remercier le Pr. Jean-Jules Brault et le Pr. Georges-Émile April d'avoir accepté de faire parti des membres du jury.

Je tiens également à remercier Bryan Tremblay, David Fecteau et Saad Chidami pour leurs conseils et leur écoute. Merci également aux personnes du laboratoire qui ont égayé mes journées, Jonathan C., Jonathan B., Charles-Henri, Christian, Maxime, Kévin.

RÉSUMÉ

Avec entre autres l'arrivée des supercondensateurs de grande capacité (plusieurs milliers de Farads), l'intérêt de les utiliser pour stocker de l'énergie est en plein essor. En effet, les supercondensateurs ont une plus grande densité de puissance que les batteries (de 1000 à 5000 W/kg pour les supercondensateurs contre 150 W/kg pour les batteries), c'est-à-dire qu'ils peuvent restituer l'énergie plus rapidement. Néanmoins, on continue tout de même à souvent utiliser des batteries en complément aux supercondensateurs, car ces derniers ont une densité d'énergie plus faible que celle des batteries (de 4 à 6 Wh/kg pour les supercondensateurs contre 50 à 1500 Wh/kg pour les batteries). À cause de leur conception, les supercondensateurs ne peuvent pas atteindre une grande tension, typiquement 2.7 à 2.85 V. Afin d'alimenter des appareils de plus haute tension, il est possible de les mettre en série. Dans ce cas, leurs tensions vont s'additionner. Lorsqu'ils sont en série, un problème survient pendant leur recharge car, ayant des capacités différentes ($\pm 20\%$), ils se rechargent à des vitesses différentes. Il y a des risques de destruction d'un supercondensateur s'il atteint une tension plus haute que celle qu'il peut supporter. Il sera aussi plus rapidement endommagé selon sa courbe de charge et de décharge. Il faut donc d'une part un moyen de protéger individuellement chaque condensateur contre les surtensions, et d'autre part, assurer la possibilité de charger chaque supercondensateur à son maximum de tension, afin de profiter du maximum de potentiel de stockage de l'ensemble du groupe. Certains systèmes existent déjà pour égaliser la tension lors de la charge et seront analysés dans la revue de littérature.

Le concept de SUPERCAPS présenté dans ce mémoire est un concept modulaire de stockage d'énergie par supercondensateurs. Contrairement à tous les systèmes de stockage par supercondensateurs existants, ce concept ne requiert pas de convertisseur de puissance entre l'organe de stockage, le réseau et/ou le système à alimenter. La cellule de stockage, telle qu'elle est conçue, permet de réaliser de façon intrinsèque la fonction de conversion de tension ou de courant selon tous les modes possibles, soit CA-CA, CA-CC, CC-CA, CC-CC. Cela en fait donc un convertisseur de puissance universel.

Dans le cadre de ce mémoire une cellule comprend 2 supercondensateurs contrôlés par 4 transistors. Avec cette architecture, les supercondensateurs peuvent se charger et se décharger lorsqu'ils sont en série dans la branche, ou d'avoir une tension constante si le supercondensateur est contourné par le courant qui circule dans la branche. Cela permet d'avoir un nombre variable de supercondensateurs en série et ainsi une tension variable selon la commande. Dans ce mémoire, ces cellules sont utilisées pour stocker de l'énergie provenant d'une source

CA ou CC et alimenter une charge résistive avec une tension CA ou CC et la tension est répartie dans les supercondensateurs. Pour cela, une modélisation des cellules est faite afin de simuler le comportement des cellules pour différents algorithmes qui les contrôlent. Deux algorithmes, qui assurent une commande en tension et/ou en courant tout en répartissant la tension dans les supercondensateurs, sont présentés et testés expérimentalement avec les cellules disponible au laboratoire comprenant des supercondensateurs de 350 F. Les résultats sont analysés dans les régimes temporel et fréquentiel.

ABSTRACT

With among others the arrival of the supercapacitors of large capacity (several thousand Farads), the interest to use them to store energy is rapidly expanding. Indeed, supercapacitors have a bigger power density than batteries (of 1000 in 5000 W/kg for supercapacitors against 150 W/kg for batteries), that is to say they can restore energy more quickly. Nevertheless, batteries are often used to complement the supercapacitors, because supercapacitors have a lower density of energy than batteries (of 4 in 6 Wh / kg for supercapacitors against 50 in 1500 Wh / kg for batteries). Because of their design, supercapacitors cannot reach a high voltage, typically 2.7 to 2.85 V. In order to power higher voltage devices, it is possible to put them in series. In this case, their voltages will add up. A problem occurs during their recharge because, having different capacities ($\pm 20\%$), they charge at different rates. There are risks of destruction of a supercapacitor if it reaches a higher voltage than it can withstand. Also it will be damaged more quickly according to its load and discharge curve. It is therefore necessary, on the one hand, to protect each capacitor individually against overvoltages and, on the other hand, to ensure that each supercapacitor can be charged to its maximum voltage in order to take advantage of the maximum storage potential of the assembly of the group. Some systems already exist to equalize the voltage during charging and will be analyzed in the literature review.

The concept of SUPERCAPS presented in this report is a modular concept of energy storage by supercapacitors. Unlike all existing supercapacitor systems, this concept does not require a power converter between the storage device, the network and/or the system to be powered. The storage cell, such as it is designed, allows to realize in an intrinsic way the function of voltage or current conversion according to all the possible modes, such as AC-AC, AC-DC, DC-AC, DC-DC. It thus makes a universal converter of power.

In the context of this work, a cell includes 2 supercapacitors controlled by 4 transistors. With this architecture, the supercapacitors can be charged and discharged when they are in series in the branch, or maintaining a constant voltage if the supercapacitor is bypassed by the current flowing in the branch. This makes it possible to have a variable number of supercapacitors in series and thus a variable voltage depending on the command. These cells are used to store energy from an AC or DC source and to supply a resistive load with an AC or DC voltage and the voltage is distributed in the supercapacitors. For that purpose, a modeling of the cells is done in order to simulate the behavior of the cells for different algorithms that control them. Two algorithms, which provide voltage and / or current control while distributing

the voltage in the supercapacitors, are presented and tested experimentally with the cells available in the laboratory including 350 F supercapacitors. The results are analyzed in time and frequency.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectif de la recherche	1
1.3 Travail réalisé	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Supercondensateurs	3
2.1.1 Introduction	3
2.1.2 Vieillessement	5
2.2 Équilibrage des tensions	8
2.2.1 Dispositifs passifs	8
2.2.2 Dispositifs actifs	10
2.3 Convertisseurs multiniveaux	12
2.3.1 Architecture "Diode-clamp"	13
2.3.2 Architecture "Flying-capacitors"	14
2.3.3 Hacheur quatre quadrants	14
2.3.4 Hacheur deux quadrants	17
2.4 Architecture "SUPERCAPS"	17
CHAPITRE 3 MODÉLISATION DU SYSTÈME	20
3.1 Fonctionnement	20
3.2 Modèle du circuit	21

3.3	Équations du circuit	23
3.4	Discrétisation des équations différentielles	23
3.5	Algorithme de résolution temporel	24
3.6	Validation du modèle numérique	25
3.6.1	Simulation de la charge d'une cellule de base	25
3.6.2	Simulation de la décharge d'une cellule de base	27
3.6.3	Simulation de la décharge d'une cellule avec inductance	29
3.6.4	Simulation de la charge de trois cellules de base	30
3.6.5	Simulation de la décharge de trois cellules de base	31
3.7	Modèle des supercondensateurs	32
3.8	Résumé	33
CHAPITRE 4 ALGORITHMES DE COMMANDE DES SUPERCONDENSATEURS		35
4.1	Simulation numérique du système complet	35
4.2	Algorithmes lors de la décharge des supercondensateurs de 3400 F	35
4.2.1	Introduction	35
4.2.2	Répartition par mouvement circulaire	36
4.2.3	Alimentation d'une charge en continu	37
4.2.4	Alimentation d'une charge en alternatif	40
4.3	Algorithmes lors de la charge des supercondensateurs de 3400 F	43
4.3.1	Charge des supercondensateurs à partir d'une source alternative	45
4.3.2	Charge des supercondensateurs à partir d'une source continue	48
4.4	Algorithmes lors de la décharge des supercondensateurs 350 F	48
4.4.1	Alimentation d'une charge en continu : 10 V	48
4.4.2	Alimentation d'une charge en alternatif : 15 V_{PEAK} à 1 Hz	52
4.5	Algorithmes lors de la charge des supercondensateurs de 350 F	54
4.5.1	Charge avec source de tension CA 15 V_{PEAK} à 0.1 Hz, courant CA	55
4.5.2	Charge avec source de tension CA 15 V_{PEAK} à 0.1 Hz, courant CC	55
4.5.3	Charge avec une source de tensions CC de 10V	55
4.6	Analyse fréquentielle des signaux	59
4.7	Vitesse de mouvement circulaire	62
4.8	Résumé	64
CHAPITRE 5 MESURES DES PERFORMANCES DU SYSTÈME RÉEL		66
5.1	Introduction	66
5.2	Montage électrique	66
5.2.1	Entrées/Sorties Hypersim	66

5.2.2	Démultiplexeur	67
5.2.3	Inverseur de polarité avec pont en H	68
5.2.4	Contrôleur de grille des MOSFETs	68
5.3	Architecture de la commande sur Hypersim et Matlab	70
5.3.1	Commande de la décharge des supercondensateurs	71
5.3.2	Commande de l'inverseur de polarité avec pont en H	73
5.3.3	Commande de la charge des supercondensateurs	74
5.3.4	Traitement des variables internes de l'algorithmes	74
5.4	Résultats	77
5.4.1	Alimentation d'une charge en CC	77
5.4.2	Alimentation d'une charge en CA	78
5.4.3	Charge des SCs avec une source CC	81
5.4.4	Charge des SCs avec une source CA	82
5.5	Résumé	88
CHAPITRE 6	CONCLUSION	90
6.1	Synthèse des travaux	90
6.2	Limitations de la solution proposée et améliorations futures	90
RÉFÉRENCES	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CC. . .	40
Tableau 4.2	Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CA. . .	43
Tableau 4.3	Paramètres pour une recharge avec une source CA et un courant CC.	46
Tableau 4.4	Paramètres pour une recharge avec une source CA et un courant CA.	52
Tableau 4.5	Valeurs des paramètres lors d'une recharge à partir d'une source CC.	52
Tableau 4.6	Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CC. . .	52
Tableau 4.7	Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CA. . .	54
Tableau 4.8	Valeurs des paramètres lors de la recharge à partir d'une source CA. .	59
Tableau 4.9	Valeurs des paramètres lors de la recharge à partir d'une source CA. .	59
Tableau 5.1	Logique combinatoire du démultiplexeur SN74154.	68
Tableau 5.2	Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CC. . .	78
Tableau 5.3	Valeurs des paramètres lors de la charge en CA.	80
Tableau 5.4	Valeurs des paramètres lors de la recharge avec une source CC. . . .	83
Tableau 5.5	Paramètres pour une recharge avec une source CA et un courant CA.	85
Tableau 5.6	Paramètres pour une recharge avec une source CA et un courant CC.	85

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Vue en coupe d'un supercondensateur vue en coupe	3
Figure 2.2	Ions proche de l'électrode.	5
Figure 2.3	Modèle électrique du supercondensateur.	5
Figure 2.4	Comparaison entre batteries et supercondensateurs	6
Figure 2.5	Durée de vie d'un supercondensateur en fonction de sa tension	7
Figure 2.6	Durée de vie d'un supercondensateur à différentes températures . . .	7
Figure 2.7	Circuit d'équilibrage de la tension avec résistances.	9
Figure 2.8	Circuit d'équilibrage de la tension avec résistances commutées. . . .	9
Figure 2.9	Circuit d'équilibrage de la tension avec diodes zéner.	9
Figure 2.10	Circuit d'équilibrage avec transformateur contrôlé au primaire. . . .	11
Figure 2.11	Circuit d'équilibrage avec transformateur contrôlé aux secondaires. . .	11
Figure 2.12	Circuit Buck-Boost pour équilibrer les tensions.	12
Figure 2.13	Circuit d'un convertisseur diode-clamp.	13
Figure 2.14	Circuit d'un convertisseur flying-capacitors.	15
Figure 2.15	Circuit d'un convertisseur avec hacheur quatre quadrants.	15
Figure 2.16	Commande des interrupteurs à largeurs d'impulsions différentes. . . .	16
Figure 2.17	Circuit d'un convertisseur avec hacheur deux quadrants.	17
Figure 2.18	Schéma d'une cellule composée de deux supercondensateurs	18
Figure 3.1	Schéma de la partie puissance d'une cellule de deux SCs.	20
Figure 3.2	Schéma de la partie puissance d'une cellule d'un SCs.	21
Figure 3.3	Schéma d'un assemblage série de supercondensateurs.	21
Figure 3.4	Modélisation de l'assemblage série de supercondensateurs.	23
Figure 3.5	Circuit étudié lors de la charge d'une cellule.	26
Figure 3.6	Résultats de la charge d'une cellule.	26
Figure 3.7	Circuit étudié lors de la décharge d'une cellule.	27
Figure 3.8	Résultats de la décharge d'une cellule.	27
Figure 3.9	Circuit étudié lors de la décharge d'une cellule avec inductance. . . .	28
Figure 3.10	Résultats de la décharge d'une cellule avec inductance.	29
Figure 3.11	Circuit étudié lors de la charge de trois cellules.	30
Figure 3.12	Résultats de la charge de trois cellules.	31
Figure 3.13	Circuit étudié lors de la décharge de trois cellules.	32
Figure 3.14	Résultats de la décharge de trois cellules.	32
Figure 3.15	Densité de probabilité de la loi normale pour 1000 supercondensateurs.	34

Figure 3.16	Densité de probabilité de la loi normale pour 10000 supercondensateurs.	34
Figure 4.1	Modèle pour la simulation sous Matlab.	35
Figure 4.2	Illustration du changement dans le vecteur S	37
Figure 4.3	Algorithme de décharge par mouvement circulaire des SCs.	38
Figure 4.4	V_b en CC avec des SCs de 3400 F.	39
Figure 4.5	SCs de 3400 F lors d'une charge en CC.	39
Figure 4.6	TDF de la tension de charge avec des SCs de 3400 F.	41
Figure 4.7	Charge en CA avec des SCs de 3400 F.	41
Figure 4.8	SCs de 3400 F lors d'une charge en CA.	42
Figure 4.9	TDF de la tension de charge avec des SCs de 3400 F.	42
Figure 4.10	Algorithme de charge des supercondensateurs.	44
Figure 4.11	Charge à courant CC avec des SCs de 3400 F.	46
Figure 4.12	SCs de 3400 F lors d'une charge à courant CC.	47
Figure 4.13	SCs de 3400 F lors de la charge à courant CC.	47
Figure 4.14	Charge à courant CA avec des SCs de 3400 F.	49
Figure 4.15	SCs de 3400 F lors d'une charge à courant CA.	49
Figure 4.16	TDF du courant alternatif redressé.	50
Figure 4.17	Charge à courant CC avec des SCs de 3400 F.	50
Figure 4.18	SCs de 3400 F lors d'une charge à courant CC.	51
Figure 4.19	Charge en CC avec des SCs de 350 F.	51
Figure 4.20	SCs de 350 F lors d'une charge en CC.	53
Figure 4.21	Charge en CA avec des SCs de 350 F.	53
Figure 4.22	SCs de 350 F lors d'une charge en CA.	54
Figure 4.23	TDF de la tension de charge avec des SCs de 350 F.	55
Figure 4.24	Charge à courant CA pour des SCs de 350 F.	56
Figure 4.25	SCs de 350 F lors de la charge à courant CA redressé.	56
Figure 4.26	TDF du courant CA pour des SCs de 350 F.	57
Figure 4.27	Charge à courant CC pour des SCs de 350 F.	57
Figure 4.28	SCs de 350 F lors de la charge à courant CC.	58
Figure 4.29	Charge à courant CC pour des SCs de 350 F.	58
Figure 4.30	SCs de 350 F lors de la charge à courant CC.	60
Figure 4.31	Sinus et signal discrétisé.	60
Figure 4.32	Agrandissement des tensions durant la charge.	63
Figure 4.33	Écart de tension en fonction du temps et du courant.	63
Figure 4.34	SCs durant plusieurs cycle de charge/décharge.	64
Figure 5.1	Entrées et sorties analogiques et numériques d'Hypersim.	66

Figure 5.2	Résistance de tirage.	67
Figure 5.3	Schéma du démultiplexeur.	69
Figure 5.4	Schéma d'un pont en H.	69
Figure 5.5	Schéma des drivers de MOSFETs.	70
Figure 5.6	Algorithme du système embarqué sous Simulink.	72
Figure 5.7	Signaux de commande générés sur Hypersim.	72
Figure 5.8	Algorithme de la commande en décharge.	73
Figure 5.9	Deux types de commandes des SCs.	74
Figure 5.10	Algorithme de la commande lors de la charge.	75
Figure 5.11	Algorithme du traitement des variables.	76
Figure 5.12	Alimentation d'une charge à 10 V.	78
Figure 5.13	Variables durant l'alimentation d'une charge à 10 V.	79
Figure 5.14	Tensions des SCs durant l'alimentation d'une charge à 10 V.	79
Figure 5.15	Alimentation d'une charge en CA.	80
Figure 5.16	Variables durant l'alimentation d'une charge en CA.	81
Figure 5.17	Tensions des SCs durant l'alimentation d'une charge en CA.	81
Figure 5.18	Transformée de Fourier du signal CA.	82
Figure 5.19	Charge des SCs à 10 V.	83
Figure 5.20	Courant dans la branche surant la charge à 10 V.	84
Figure 5.21	Tensions des SCs durant la charge à 10 V.	84
Figure 5.22	Charge des SCs à 15 V CA pour un courant CC.	85
Figure 5.23	Courant CC dans les SCs à 15 V CA.	86
Figure 5.24	Charge des SCs à 15 V CA pour un courant CA.	87
Figure 5.25	Courant CA dans les SCs à 15 V CA.	87
Figure 5.26	Transformée de Fourier du signal.	88
Figure 5.27	Tensions des SCs pour une charge CA à courant CC.	88
Figure 5.28	Tensions des SCs pour une charge CA à courant CA.	89

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a	Numéro du 1er supercondensateur en conduction dans la branche
ϵ	Permittivité de l'électrolyte
θ_c	Température du supercondensateur
θ_c	Constante de température
θ_c^{ref}	Température de référence du supercondensateur
C_a	Capacité de l'anode du supercondensateur
C_c	Capacité de la cathode du supercondensateur
C_i	Capacité d'un supercondensateur i
C_0	Capacité initiale du supercondensateur
ESR	Résistance équivalente série du supercondensateur
ESR_0	Résistance équivalente initiale du supercondensateur
I_b	Courant circulant dans une branche de supercondensateur
I_c^{RMS}	Courant RMS circulant dans un supercondensateur
k^{RMS}	Coefficient d'accélération du vieillissement
n	Nombre de supercondensateurs qui conduisent dans la branche
N	Nombre total de supercondensateurs dans la branche
R_{eq}	Résistance équivalente d'un circuit
R_b	Résistance équivalente d'une branche de supercondensateurs d'un circuit
R_c	Résistance $R_{DS(on)}$ du transistor de contour d'un supercondensateur
R_s	Résistance $R_{DS(on)}$ du transistor en serie avec le supercondensateur
SCs	Supercondensateurs
V_b	Tension aux bornes d'une branche de supercondensateur
V_c	Tension aux bornes du supercondensateur
V	Tension aux bornes de la capacité du supercondensateur
V_{ch}	Tension aux bornes d'une charge
$V^{tot}(t)$	Somme des tensions des capacités des supercondensateurs
$V_i(t)$	Tension d'un supercondensateur i au temps t
V_s	Tension aux bornes d'une source de tension
V_c^{ref}	Tension de référence d'un supercondensateur
SoA	Âge du supercondensateur en fonction du temps
T_{exp}	Durée de vie d'un supercondensateur
T_{exp}^{ref}	Durée de vie de référence d'un supercondensateur

TDF Transformée Discrète de Fourier

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Le développement des énergies renouvelables et le besoin d'ajuster la production en fonction de la demande sont des motivations au stockage d'énergie. En complément des dispositifs de stockage, les convertisseurs de puissance jouent un rôle important. Ils permettent de convertir la tension produite, qui peut être en CA ou CC, en une forme de tension qui convient au dispositif de stockage, souvent en CC, ou à une source à alimenter, comme le réseau électrique. Parmi les dispositifs de stockage qui existent, ce mémoire se concentre sur le stockage par supercondensateurs. Un dispositif de stockage incluant un convertisseur CA/CA, CA/CC, CC/CA, CC/CC dans son architecture est étudié.

1.2 Objectif de la recherche

L'objectif de ce travail de recherche est de démontrer la généricité et l'utilisabilité de SUPERCAPS, un système de stockage qui réalise de façon intrinsèque la fonction de conversion de tension ou de courant (CA/CA, CA/CC, etc.). SUPERCAPS est un système modulaire composé de cellules de supercondensateurs et de MOSFETs.

Dans le cadre de ce projet, les objectifs spécifiques suivants sont poursuivis :

- Modéliser les cellules SUPERCAPS,
- Alimenter une charge en CA et en CC à partir d'un assemblage série de cellules, à des fréquences et des tensions différentes via un contrôle implémenté dans un simulateur en temps réel couplé au système physique de l'étude,
- Charger les cellules depuis une source de tension CA et CC à des fréquences et des tensions différentes,
- Assurer la répartition de la tension dans les supercondensateurs durant la charge et la décharge.

Dans la première partie de la revue de littérature, les supercondensateurs sont expliqués ainsi que leurs différences par rapport aux batteries, leurs avantages, inconvénients et les problèmes liés à leur utilisation. Puisque la tension d'un supercondensateur ne dépasse pas les 2.7 V à 2.85 V, afin d'obtenir une grande tension avec des supercondensateurs, il est nécessaire de les mettre en série. Il existe déjà des façons d'assembler en série des supercondensateurs. Ces montages, leurs problèmes et les manières avec lesquelles ils sont résolus dans la littérature sont détaillés dans la seconde partie de la revue de littérature. Enfin, après avoir stocké

l'énergie, il faut la restituer. Cette fonction est normalement réalisée par un convertisseur de puissance. Parmi les convertisseurs de puissance, les convertisseurs multiniveaux sont ceux qui ressemblent le plus à l'architecture proposée dans ce mémoire. Ils consistent en une association série-parallèle de semiconducteurs pour générer des niveaux de tensions. Chaque "niveau" est un assemblage de sources CC comme des condensateurs, des batteries, etc. Ils sont résumés dans la troisième partie de la revue de littérature.

1.3 Travail réalisé

Une modélisation des cellules SUPERCAPS est faite afin de simuler le comportement physique d'une cellule. Une analyse théorique est faite et validée par des exemples pour chaque composant. Un algorithme est développé sur Matlab afin de permettre aux cellules SUPERCAPS en série d'alimenter une charge avec une tension continue ou alternative et de se recharger à partir d'une source de tension continue ou alternative, en assurant que les supercondensateurs se déchargent ou se rechargent de manière uniforme. Dans une première partie, les résultats des cellules SUPERCAPS de 3400 F sont montrés car ils illustrent les capacités d'un convertisseur de puissance SUPERCAPS. Dans un second temps, les résultats des simulations avec des cellules SUPERCAPS de 350 F sont présentés car ils seront comparés aux performances mesurées sur le système réel. Le montage des essais est détaillé et les résultats présentés.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Supercondensateurs

2.1.1 Introduction

Les supercondensateurs sont des condensateurs électrolytiques composés de deux électrodes, séparées par une pellicule diélectrique poreuse qui sert d'isolation entre celles-ci. Les électrodes sont généralement constituées de charbon dit actif : le charbon actif est une matière de carbone poreuse. C'est grâce à ce matériau que les électrodes peuvent être imbibées d'électrolyte, un liquide conducteur contenant des particules électriquement chargées : des ions. La structure d'un supercondensateur est illustré à la Figure 2.1.

Lorsque l'on applique une tension aux bornes du supercondensateur, les anions, de charge négative, viennent se coller sur l'électrode positive (la cathode), et les cations, de charge positive, viennent se coller sur l'anode, l'électrode négative. Il y a une distance très faible entre l'électrode et les ions de l'ordre du nanomètre, constituée d'une molécule d'eau ou d'un

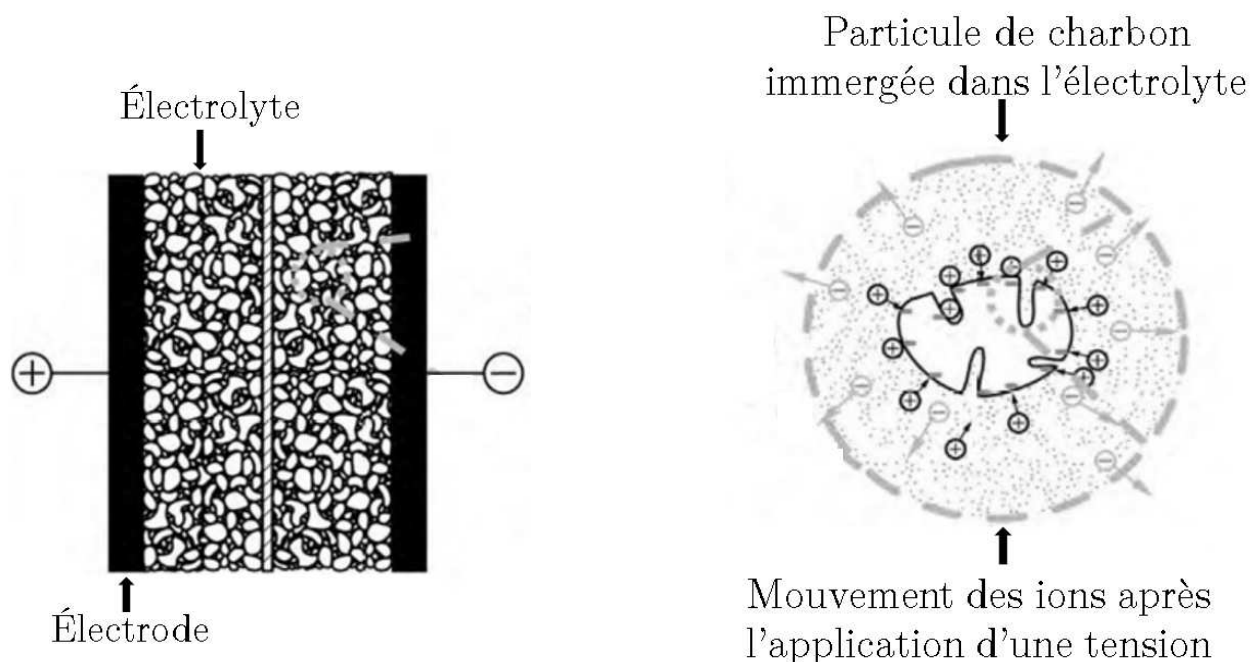


Figure 2.1 Vue en coupe de la structure d'un supercondensateur, particule de charbon dans l'électrolyte (voir Ike et al. (2015)).

autre solvant, lequel agit comme barrière diélectrique (voir Winter and Brodd (2004)). La capacité s'exprime en fonction de S , la surface des électrodes, d , la distance entre les charges et l'électrode, et ϵ la permittivité de l'électrolyte :

$$C = \frac{\epsilon S}{d}. \quad (2.1)$$

La capacité étant inversement proportionnelle à la distance entre les charges et l'électrode, elle est nettement augmentée dans le supercondensateur par rapport aux condensateurs électrolytiques dans lesquels le diélectrique est beaucoup plus épais que la monocouche d'eau d'un supercondensateur. De plus, l'électrode étant poreuse, la surface de contact avec des ions est plus grande que dans les condensateurs électrolytiques classiques. La capacité étant proportionnelle à la surface S dans l'équation (2.1), elle est donc plus importante que celles des autres types de condensateurs, comme on peut le voir sur la Figure 2.1. Comme les ions positifs et négatifs n'ont pas la même taille (voir Winter and Brodd (2004)), la capacité formée à l'anode C_a est plus petite que celle formée à la cathode C_c . Sur la Figure 2.2, la distance d_c entre les charges positives et l'électrode, prise au centre de l'ion est plus grande que la distance d_a entre les anions et l'électrode. La capacité de l'anode est donc plus faible que celle de la cathode, typiquement $C_c = 10 \cdot C_a$.

On peut alors modéliser le supercondensateur comme un condensateur C_a représentant la capacité à l'anode, en série avec une résistance R , qui représente la résistance interne, en série avec un condensateur C_c , qui représente la capacité de la cathode, tel illustré sur la Figure 2.3. Ainsi, le supercondensateur tient son nom de double couche électrolytique ou en anglais, EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitor). Les deux condensateurs en séries peuvent être associés en un seul supercondensateur, et la capacité équivalente est approximativement celle de la plus petite capacité :

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c} \\ \frac{1}{C} &\approx \frac{1}{C_a} + \frac{1}{10C_a} \\ C &\approx C_a \end{aligned}$$

Cependant, dû à la composition de l'électrolyte, la tension entre les bornes du supercondensateur ne peut pas dépasser 2.7 V à 2.85 V (voir Ike et al. (2015); Burke (2000); Zubietta and Bonert (2000)).

À la Figure 2.4, les batteries et supercondensateurs sont comparés en termes de densité de

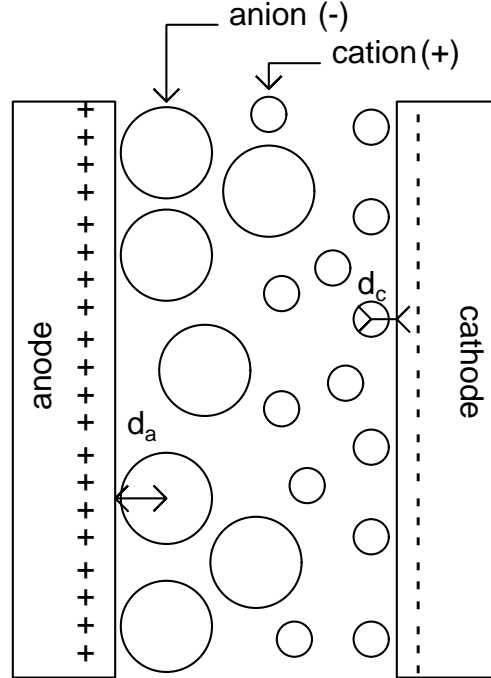


Figure 2.2 Ions positifs (cations) et négatifs (anions) proche de l'électrode.

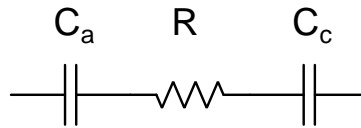


Figure 2.3 Modèle électrique du supercondensateur.

puissance en abscisse, et de leur densité d'énergie en ordonnée, sur une échelle logarithmique. Les supercondensateurs ont la plus grande densité de puissance (W/kg) des technologies de stockage. Cependant, leur densité d'énergie est plus faible que celles des batteries ou des piles à combustible : 4 à 7 Wh/kg pour les supercondensateurs contre 150 à 1500 Wh/kg pour les piles à combustibles et 50 à 1500 Wh/kg pour les batteries.

2.1.2 Vieillessement

À mesure que le supercondensateur vieillit, sa capacité diminue et sa résistance interne (en anglais Equivalent Series Resistance, ou *ESR*) augmente (voir Rizoug et al. (2010)). Un supercondensateur est considéré en fin de vie lorsque sa capacité est réduite de 20% et que son *ESR* a doublé. Il est important de prévoir un système qui n'accroît pas le vieillissement des supercondensateurs. Dans le modèle utilisé dans ce mémoire, la dépendance en température

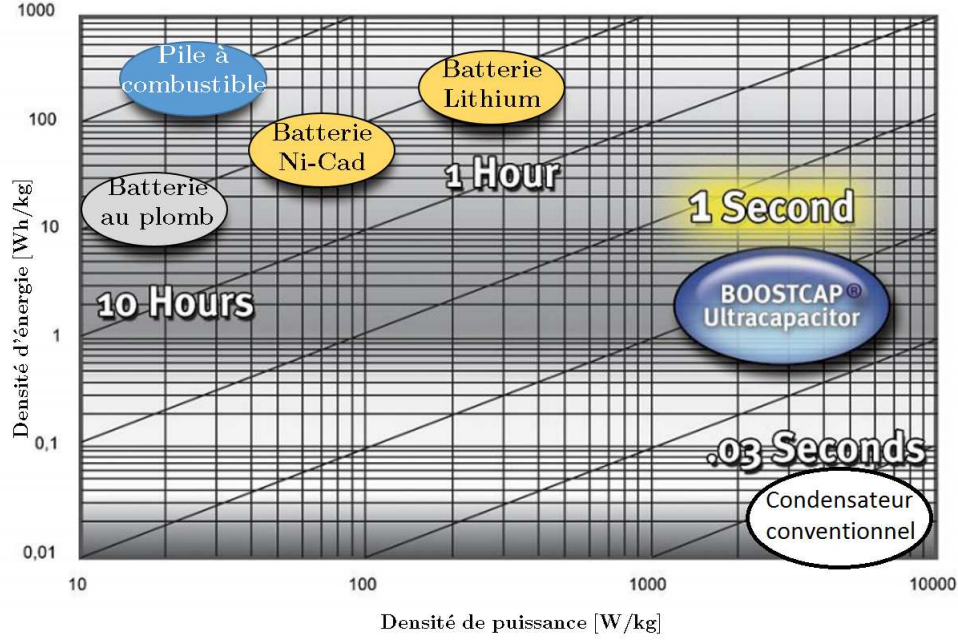


Figure 2.4 Comparaison entre batteries, supercondensateurs et piles à combustible en termes de densité d'énergie et de densité de puissance (voir Dietrich (2001)).

de l'ESR et de la capacité n'est pas prise en compte.

L'équation d'Eyring, i.e (2.2) exprime la durée de vie du supercondensateur en fonction de la tension et de la température (voir Linzen et al. (2005)). L'équation est illustrée à la Figure 2.5 et représente la durée de vie en fonction de la tension de fonctionnement des supercondensateurs et en fonction de la température.

$$T_{exp}(V_c, \theta_c) = T_{exp}^{ref} \cdot \exp\left(\ln(2) \cdot \frac{\theta_c^{ref} - \theta_c}{\theta_0}\right) \cdot \exp\left(\ln(2) \cdot \frac{V_c^{ref} - V_c}{V_0}\right), \quad (2.2)$$

où T_{exp} est la durée de vie en heures, θ_c la température du supercondensateur et V_c la tension. Le temps de vie d'un supercondensateur à température θ_c^{ref} vaut T_{exp}^{ref} , avec θ_c^{ref} la température maximale de fonctionnement. Pour doubler le temps de vie, il est nécessaire de diminuer la température θ_c^{ref} de θ_0 et la tension V_c^{ref} de V_0 . Une nouvelle variable est définie : *SoA* (State of Aging) qui représente l'âge en fonction du temps (voir Kovaltchouk et al. (2015)) :

$$\frac{dSoA}{dt}(V, \theta_c) = \frac{1}{T_{exp}(V, \theta_c)} \cdot \exp\left(k_{RMS} \cdot \frac{I_{RMS}}{C_0}\right)$$

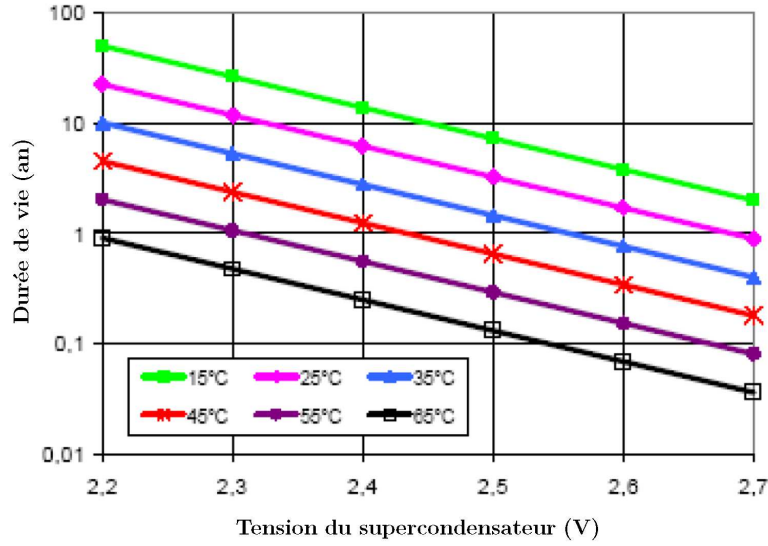


Figure 2.5 Durée de vie d'un supercondensateur en fonction de sa tension de fonctionnement et de sa température (voir Linzen et al. (2005)).

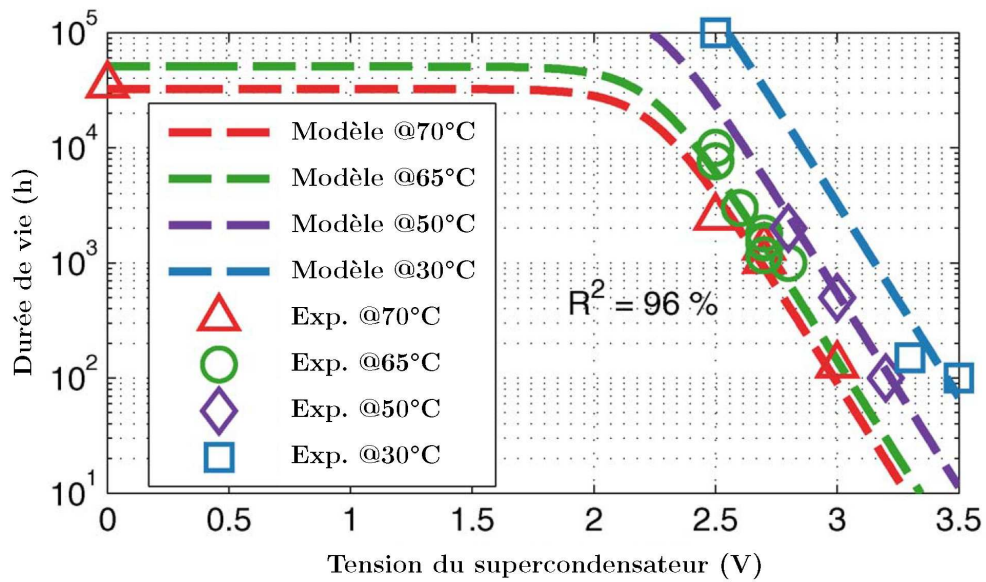


Figure 2.6 Durée de vie d'un supercondensateur à différentes températures en fonction de la tension (voir Kovaltchouk et al. (2015)).

avec k_{RMS} un coefficient d'accélération du vieillissement et I_{RMS} , le courant RMS circulant dans le supercondensateur. La capacité et l'ESR valent respectivement en fonction du *SoA* (voir Kovaltchouk et al. (2015)) :

$$C = C_0 \cdot (0.95 - 0.15SoA)$$

$$ESR^{-1} = ESR_0^{-1} \cdot (1 - 0.3SoA)$$

où C_0 et ESR_0 sont respectivement les valeurs initiales de la capacité et de la résistance série équivalente.

Des résultats expérimentaux et le modèle théorique sont comparés sur la Figure 2.6. Le modèle est fidèle à la réalité pour les différentes températures étudiées.

2.2 Équilibrage des tensions

Pour obtenir une grande tension avec des supercondensateurs, il est nécessaire d'en mettre plusieurs en série. Lors de sa fabrication, le supercondensateur possède une capacité pouvant varier de $\pm 20\%$. Lors de la charge de supercondensateurs en série, le même courant les traverse tous. Comme leurs capacités sont différentes, leurs tensions seront différentes. Cela implique une tension différente pour chaque supercondensateur : plus la capacité est petite, plus le supercondensateur sera rechargé rapidement. Il faut arrêter la charge dès qu'un supercondensateur est chargé à sa tension maximale. Cependant, les autres supercondensateurs ne seront pas totalement chargés. Il y a donc une sous-exploitation de la capacité totale de stockage. Pour pouvoir stocker un maximum d'énergie, il est essentiel de pouvoir égaliser les tensions des supercondensateurs, de façon à ce qu'ils puissent tous être chargés jusqu'à leur tension maximale (voir Barrade (2002)). Pour cela, il existe plusieurs dispositifs, qui peuvent être classés en deux groupes : les dispositifs passifs et actifs.

2.2.1 Dispositifs passifs

Les dispositifs passifs n'ont pas besoin de contrôle extérieur. Ils sont composés d'éléments passifs (résistances, diodes).

Resistance Une résistance R_{equal} est placée en parallèle à chaque supercondensateur C_i , tel qu'illustré à la Figure 2.7. La valeur de la résistance dépend de la tension maximale du supercondensateur et de la valeur de son courant de fuite. Elle doit être dimensionnée en fonction du supercondensateur. Cette méthode consomme donc beaucoup d'énergie car elle dissipe constamment une portion de l'énergie stockée dans le supercondensateur.

Une variante de cette méthode se compose de résistances commutées, tel qu'illustré à la Figure 2.8, avec R la résistance et S_i l'interrupteur. Lorsque le supercondensateur dépasse

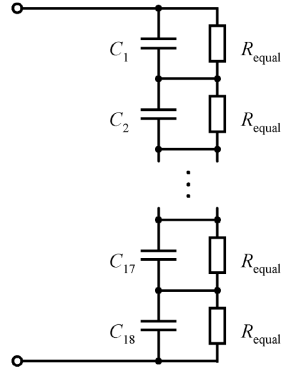


Figure 2.7 Circuit d'équilibrage de la tension des supercondensateurs avec résistances (voir Linzen et al. (2005)).

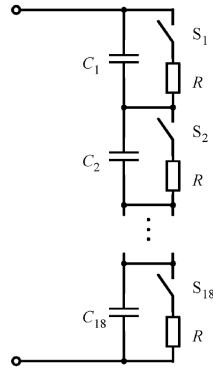


Figure 2.8 Circuit d'équilibrage de la tension des supercondensateurs avec résistances commutées (voir Linzen et al. (2005)).

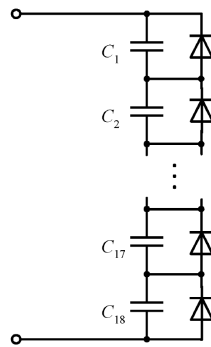


Figure 2.9 Circuit d'équilibrage de la tension des supercondensateurs avec diodes zéner (voir Linzen et al. (2005)).

sa tension maximale, la résistance R est ajoutée en parallèle grâce à l'interrupteur S_i , qui se ferme pour dissiper l'énergie. Cette méthode consomme moins d'énergie, car la résistance n'est pas présente en tout temps, mais son principe de fonctionnement est basé sur la dissipation d'énergie. L'énergie est dissipée seulement lorsque le supercondensateur approche de la tension maximale.

Diode Zener Une diode zener est ajoutée en parallèle à chaque supercondensateur, tel qu'illustré sur le circuit de la Figure 2.9. Lorsque la tension du supercondensateur dépasse le seuil de la mise en conduction de la diode zener, cette dernière se met en conduction et dissipe une puissance égale à $V_{ci}i$. Le niveau d'énergie dans le supercondensateur est alors saturé et égal à $\frac{1}{2}C_iV_{ci}^2$. La diode est donc choisie en fonction de la tension maximale du supercondensateur et de la valeur du courant de charge.

2.2.2 Dispositifs actifs

Les dispositifs actifs permettent d'obtenir un rendement plus élevé car l'énergie est redistribuée entre les supercondensateurs plutôt que dissipée (voir Barrade (2002); Lu et al. (2007); Diab et al. (2006)).

Transformateur Flyback Le circuit est détaillé à la Figure 2.10. Le transformateur transfère l'énergie de la source aux supercondensateurs. Le transistor nMOS T permet de faire passer le courant dans le primaire N_p du transformateur et les secondaires N_{si} sont branchés en série avec une diode D_i et un supercondensateur C_i : lorsque le transistor T est passant, le transformateur stocke de l'énergie à travers le primaire, qui est transférée aux supercondensateurs via le secondaire et la diode lorsque le transistor T est bloqué. Comme la tension est bien répartie aux secondaires du transformateur, chaque supercondensateur est rechargé à la même tension.

Le circuit de la Figure 2.11 est inspiré du circuit de la Figure 2.10 : un supercondensateur C_i est en parallèle avec le primaire N_{pi} d'un transformateur lui-même en série avec un transistor T_i . Ce circuit permet de répartir l'énergie du supercondensateur possédant la plus haute tension à ceux qui sont moins chargés. Lorsqu'un supercondensateur possède une tension plus haute que les autres, son transistor T_i devient passant, et l'énergie du supercondensateur est transmise aux autres sans être stockée dans l'inductance du transformateur, ce qui limite les pertes. Cependant, ceci vient au prix d'une complexité accrue en termes de commutation et d'une augmentation du nombre de transistors dans le circuit, sans compter la présence d'un circuit magnétique multi-enroulements.

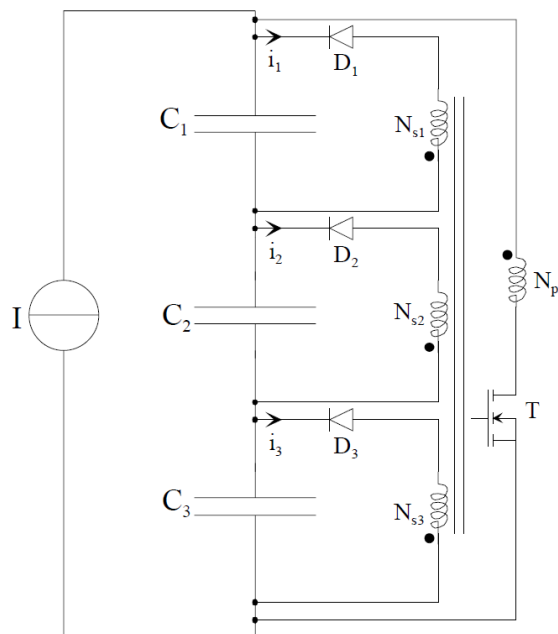


Figure 2.10 Circuit d'équilibrage de la tension avec transformateur Flyback contrôlé au primaire (voir Barrade (2002)).

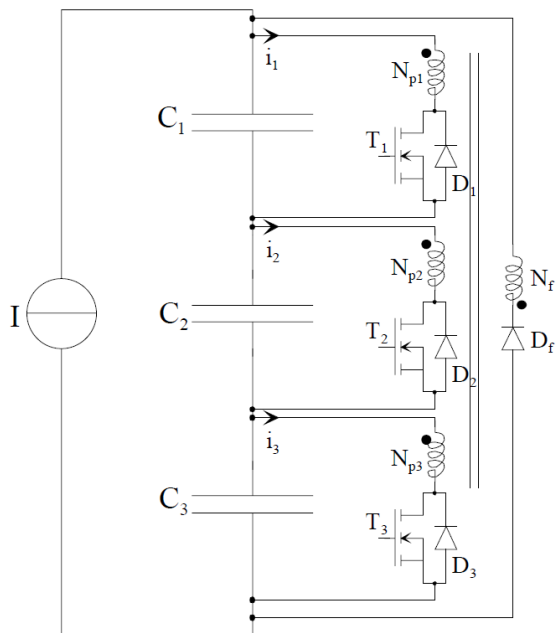


Figure 2.11 Circuit d'équilibrage de la tension avec transformateur Flyback contrôlé aux secondaires (voir Barrade (2002)).

Buck Boost Le circuit est détaillé à la Figure 2.12. Ce circuit est composé de convertisseurs DC/DC qui permettent à un supercondensateur de transférer de l'énergie à ses deux voisins.

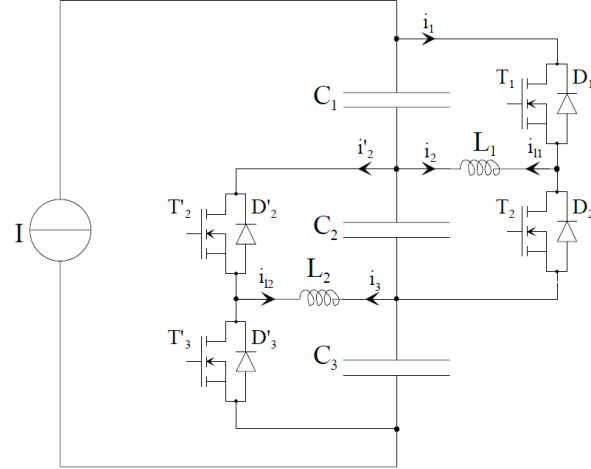


Figure 2.12 Circuit Buck-Boost pour équilibrer les tensions des supercondensateurs (voir Barrade (2002)).

Le transistor T_i est placé en série avec l'inductance L_i , et en parallèle au supercondensateur C_i . En déviant le courant, ce circuit permet d'équilibrer les tensions sans stocker l'énergie. Cependant, le supercondensateur C_1 ne peut pas transférer de l'énergie à C_3 sans passer par le supercondensateur C_2 . Par conséquent plus le nombre de supercondensateur en série est grand, plus le transfert d'énergie entre le premier et le dernier supercondensateur devient difficile.

2.3 Convertisseurs multiniveaux

Le convertisseur multiniveaux permet de créer des formes d'onde de tension par palier à partir de différents types de sources DC (batteries, condensateurs, etc.). Dans la littérature, les convertisseurs multiniveaux sont principalement composés de condensateurs, car leur densité de puissance en font des éléments parfaits pour les applications à haute puissance comme dans les véhicules électriques (voir Manenti et al. (2011)). Le courant et la tension sont déphasés de $\pi/2$. Les condensateurs sont déchargés pendant le premier quart de la sinusoïde puis chargés dans le deuxième quart.

Ces convertisseurs permettent d'obtenir une grande tension de sortie avec moins de pertes et une plus grande fiabilité que les convertisseurs source de haute tension (HVSC : High Voltage Source Converter), en plus d'être modulaires et plus faciles à la maintenance (voir Münch et al. (2010)). De plus, ils ne nécessitent pas de compensation réactive ou de filtre.

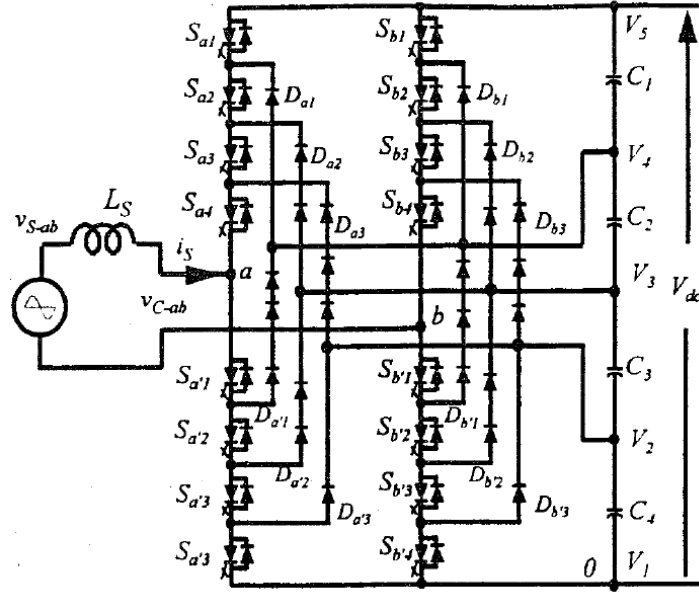


Figure 2.13 Circuit d'un convertisseur de type "diode-clamp" (voir Lai and Peng (1996)).

2.3.1 Architecture "Diode-clamp"

Ce convertisseur consiste en plusieurs supercondensateurs C_i en serie, tel que montré à la Figure 2.13. La somme des tensions des condensateurs crée un bus DC qui vaut V_{dc} sur le circuit de la Figure 2.13. Les interrupteurs sont disposés de façon à former un pont en H, avec quatre fois plus d'interrupteurs que de condensateurs. Il est donc possible de générer des tensions positives et négatives.

Pour avoir une tension maximale, tous les interrupteurs dans le quadrant en haut à gauche (S_{a1}, \dots, S_{a4}) et en bas à droite ($S_{b'1}, \dots, S_{b'4}$) doivent être passants.

Pour diminuer la tension, un interrupteur du quadrant en haut à gauche (S_{a1}) doit être bloqué, et son complémentaire en bas à gauche ($S_{a'1}$) doit être mis en conduction.

Pour avoir une tension nulle, tous les interrupteurs en bas ($S_{a'1}, \dots, S_{a'4}, S_{b'1}, \dots, S_{b'4}$) doivent être passants.

Pour les tensions négatives, comme le montage est symétrique, tous les interrupteurs en bas à gauche ($S_{a'1}, \dots, S_{a'4}$) et en haut à droite (S_{b1}, \dots, S_{b4}) doivent être passants.

Pour avoir une tension négative plus faible, un interrupteur en haut à droite (S_{b1}) doit être mis en blocage, et son complémentaire en bas à droite ($S_{b'1}$) doit être mis en conduction.

Les inconvénients de ce montages résident dans les diodes et les transistors. Chacune des diodes doit bloquer des tensions différentes. Par exemple, lorsque tous les interrupteurs en bas à gauche ($S_{a'1}, \dots, S_{a'4}$) sont passants, la diode $D_{a,1}$ doit bloquer la tension de trois

condensateurs en série. De plus, dû à leur commande, certains interrupteurs sont passants plus longtemps que d'autres, ce qui force à surdimensionner les semiconducteurs.

L'avantage d'un tel convertisseur est qu'il offre un niveau suffisant de condensateurs pour que le contenu harmonique ne nécessite pas de filtres. La commande des interrupteurs est simple et le rendement du système est élevé si les interrupteurs à semiconducteurs sont bien choisis (voir Lai and Peng (1996)).

2.3.2 Architecture "Flying-capacitors"

L'architecture "flying-capacitor" consiste essentiellement en un hacheur quatre quadrants. Son circuit est illustré à la Figure 2.14. Entre le premier interrupteur du quadrant en bas à gauche ($S_{a'4}$) et le dernier interrupteur en haut à gauche (S_{a4}), il y a un condensateur C_{a1} . Entre le deuxième interrupteur en bas à gauche ($S_{a'3}$) et l'avant-dernier en haut à gauche (S_{a3}), il y a deux condensateurs C_{a2} , etc.

Il y a donc autant de condensateurs qu'il y a d'interrupteurs. Il est toujours possible d'obtenir des tensions négatives, et les combinaisons d'interrupteurs pour obtenir une tension particulière sont plus nombreuses que dans l'architecture "diode-clamp".

L'avantage d'une telle architecture réside dans le nombre d'interrupteur qui fournit une redondance de combinaisons pour équilibrer les niveaux de tension des condensateurs.

En revanche, la commande des interrupteurs devient plus complexe et la taille du système est plus grande à cause de l'augmentation du nombre de condensateurs (voir Lai and Peng (1996)).

2.3.3 Hacheur quatre quadrants

Dans cette architecture, chaque condensateurs possède son propre hacheur quatre quadrants, tel qu'illustré à la Figure 2.15 .

Cela permet à chaque hacheur d'avoir à ses bornes la tension d'un condensateur ou la même tension en négatif. Il y a donc 3 états possible pour une cellule et quatre fois plus d'interrupteurs que de condensateurs (voir Lai and Peng (1996)).

La commande de cette architecture consiste à mettre en conduction les interrupteurs 180° avec des largeurs d'impulsion différentes. Cette commande est illustrée à la Figure 2.16, où la tension de sortie du convertisseur est détaillée en fonction de la commande des interrupteurs. Les angles de commutation ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5$) des interrupteurs sont choisis de manière à éliminer l'harmonique de basse fréquence et à limiter le taux de distorsion harmonique : TDH. Pour cela, la tension de sortie du convertisseur peut être exprimée en fonction des angles de com-

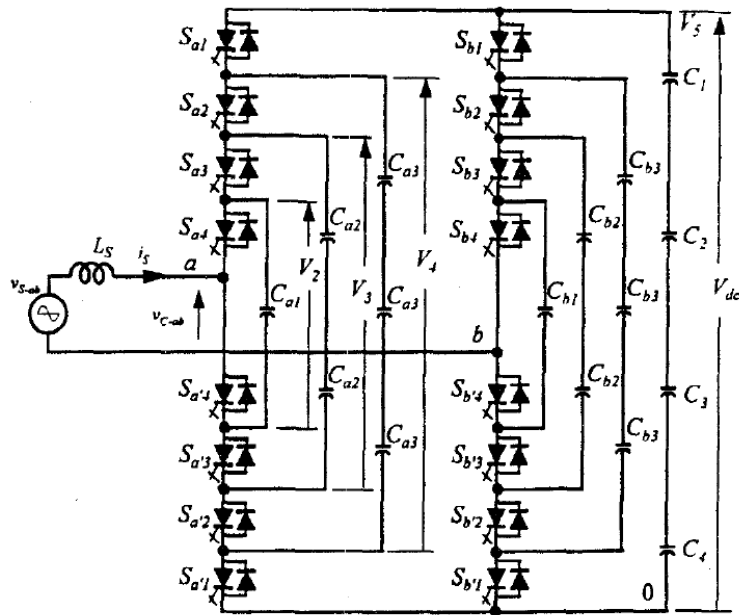


Figure 2.14 Circuit d'un convertisseur du type "flying-capacitors" (voir Lai and Peng (1996)).

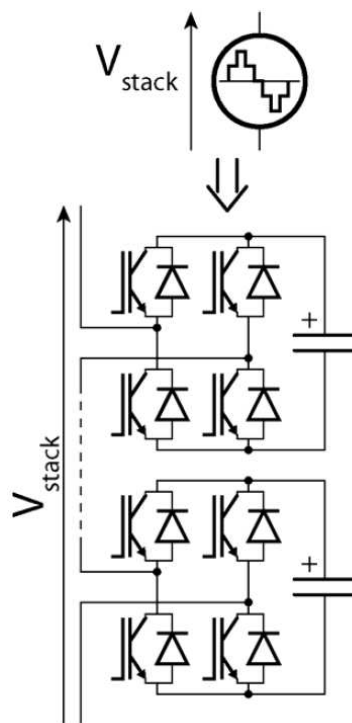


Figure 2.15 Circuit d'un convertisseur avec hacheur quatre quadrants (voir Merlin et al. (2014)).

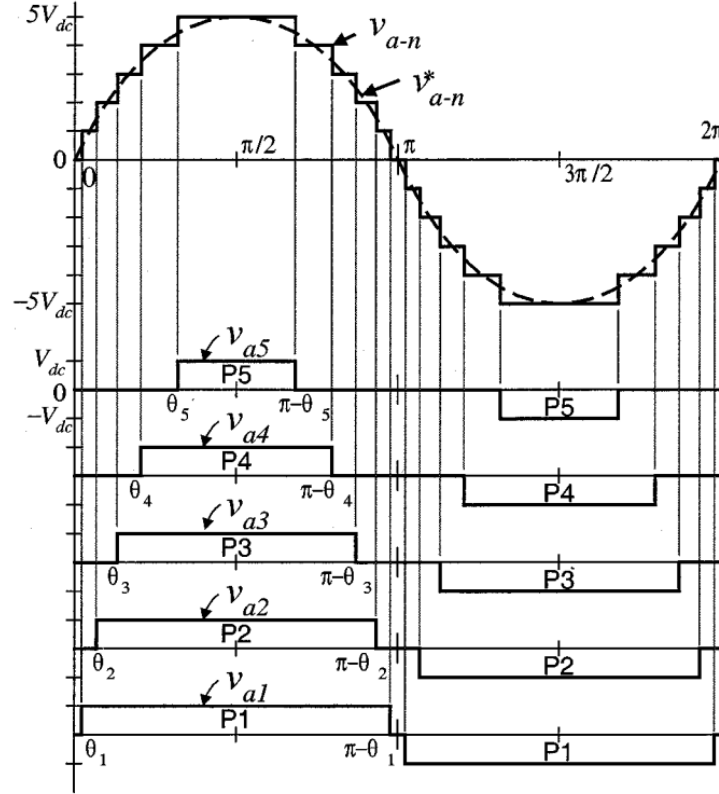


Figure 2.16 Tension de sortie et commande des interrupteurs à largeur d'impulsion différentes d'un convertisseur avec une architecture de hacheur quatre quadrants pour contrôle de la tension de sortie (voir Tolbert et al. (2002)).

mutation des interrupteurs. Il est donc possible de calculer les coefficients de Fourier et le TDH en fonction des angles de commutation et de résoudre les équations afin d'éliminer la basse fréquence et limiter le TDH. Cependant, les condensateurs ne se déchargent pas tous à la même vitesse (voir Tolbert et al. (2002)).

La deuxième méthode consiste à changer l'ordre de commande des interrupteurs tous les demi-cycles. Cette commande est illustrée à la Figure 2.16, où la tension de sortie du convertisseur est détaillée en fonction de la commande des interrupteurs. Lors de la première sinusoïde, le condensateur C_1 fournit de l'énergie pendant une durée P_1 , le condensateur C_2 pendant une durée P_2 (plus faible que P_1), etc. Dans la deuxième moitié du cycle, le condensateur C_1 fournit de l'énergie pendant une durée P_2 , le condensateur C_2 pendant une durée P_3 , etc. Cela permet, si les capacités des condensateurs sont égales, de les décharger de manière égale. L'avantage de ce montage est la modularité du système, car chaque condensateur avec son hacheur représentent un module. De plus, une commutation lente des interrupteurs permet de limiter les pertes et d'éviter des filtres R-L-C (voir Lai and Peng (1996)).

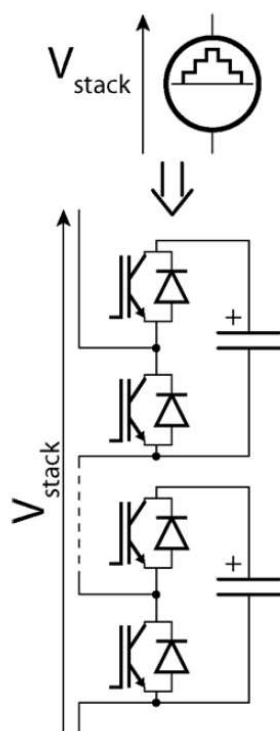


Figure 2.17 Circuit d'un convertisseur avec hacheur deux quadrants (voir Merlin et al. (2014)).

2.3.4 Hacheur deux quadrants

Le circuit du hacheur deux quadrants est illustré à la Figure 2.17. Les coûts sont diminués par rapport au hacheur quatre quadrants car le nombre d'interrupteurs est moindre. Il est impossible d'obtenir une tension négative avec cette architecture. Pour arriver à avoir une tension négative, la tension doit être prise au point milieu de la branche. Cette architecture est souvent retrouvée en triphasé. Les condensateurs au-dessus du point milieu servent à faire une tension positive, et ceux en-dessous, une tension négative. Il existe différentes commande pour les interrupteurs : par modulation à largeur d'impulsion (en anglais Pulse Width Modulation, ou PWM) ou par modulation à basse fréquence (voir Ilves et al. (2012), Tu et al. (2011), Merlin et al. (2014), Merlin and Green (2014) et Tolbert et al. (2002)).

2.4 Architecture "SUPERCAPS"

SUPERCAPS est un système modulaire composé d'un agencement série de cellules de super-condensateurs et de MOSFETs, tel qu'illustré à la Figure 2.18. Le fonctionnement détaillé

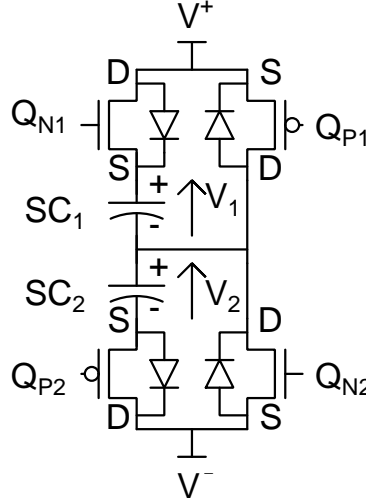


Figure 2.18 Schéma d’une cellule de base de l’architecture SUPERCAPS, composé de deux supercondensateurs SC_1 et SC_2 (voir Morin (2013)), et quatre MOSFETs, soit deux nMOS et deux pMOS.

sera explicité au chapitre suivant.

Le concept de SUPERCAPS ressemble à un convertisseur à deux quadrant mais ne peut opérer en continu car la bidirectionalité de MOSFETs est utilisée afin de charger et décharger les supercondensateurs, contrairement au convertisseur deux quadrants qui possède un circuit dédié à la charge des condensateurs. L’architecture de ces cellules permet d’insérer le supercondensateur dans le circuit série, ou simplement de le contourner. Dans la version initiale conçue à Polytechnique à Montréal, les interrupteurs utilisés sont des MOSFET nMOS et pMOS. Il est possible d’avoir une résistance en conduction du MOSFET très basse afin de limiter les pertes en conduction. En référence à la Figure 2.18, lors de la charge du supercondensateurs SC_i , le courant traverse le transistor Q_{N1} si celui ci est mis en conduction, ou sinon sa diode. Si Q_{N1} est bloqué, le courant contourne le supercondensateur SC_1 via Q_{P1} .

En mode de décharge, i.e. SC_1 est utilisé comme source de tension pour alimenter une charge, si Q_{N1} est mis en conduction, le courant traverse SC_1 et Q_{N1} . S’il est bloqué, le courant contourne le supercondensateur via Q_{P1} ou sa diode. Le courant doit toujours disposer d’un chemin, que ce soit par les diodes ou les transistors. En aucun cas les deux transistors ne doivent être mis en conduction en même temps car cela court-circuiterait le supercondensateur. Puisque chaque supercondensateur possède une commande distincte, le système est modulaire (voir Morin (2013)). En mettant les cellules en séries, on obtient une branche de supercondensateurs pouvant générer une grande tension si requis. Comme chaque supercondensateur peut être inséré ou contourné indépendamment des autres, il est possible d’obtenir

autant de tensions différentes qu'il existe de supercondensateurs dans la branche, et d'obtenir différentes formes d'onde de tension en effectuant une commande adéquate. Cette architecture offre aussi la possibilité d'égaliser la tension des supercondensateurs, car un supercondensateur trop chargé peut être contourné jusqu'à ce que les autres supercondensateurs présents dans la branche se chargent jusqu'à la tension désirée.

CHAPITRE 3 MODÉLISATION DU SYSTÈME

3.1 Fonctionnement

Dans le cadre de ce mémoire, la configuration d'une cellule à base de supercondensateurs étudiée est celle illustrée à la figure 3.1. La cellule de base est composée de deux supercondensateurs SC_1 et SC_2 et des transistors Q_{N1} , Q_{N2} , Q_{P1} et Q_{P2} , qui servent à contrôler le chemin pris par le courant entre V^+ et V^- . Les transistors Q_{P1} et Q_{N1} sont complémentaires, c'est-à-dire que quand l'un est en conduction, l'autre est en blocage et vice-versa. Il en est de même pour Q_{P2} et Q_{N2} . D'un point de vue de la modélisation, les transistors peuvent être assimilés à des interrupteurs parfaits en série avec une résistance $R_{DS(on)}$.

Lorsque l'on applique une tension positive entre V^+ et V^- et que le transistor Q_{N1} est passant, le courant circule dans le transistor Q_{N1} et dans le supercondensateur SC_1 . Toujours avec une tension positive entre V^+ et V^- et le transistor Q_{P1} passant, le courant circule alors dans le transistor Q_{P1} contournant ainsi le supercondensateur SC_1 . C'est aussi le cas pour le supercondensateur SC_2 , dans lequel circulera le courant si le transistor Q_{P2} est passant. Cette cellule a été conçue par le professeur Georges-Émile April durant la maîtrise de Jean-Nicolas Morin (voir Morin (2013)). Il y a deux supercondensateurs dans une cellule afin de créer une tension bipolaire pour alimenter la commande locale des transistors. La commande de la cellule est donc alimentée avec l'énergie des supercondensateurs. Considérant cela, les

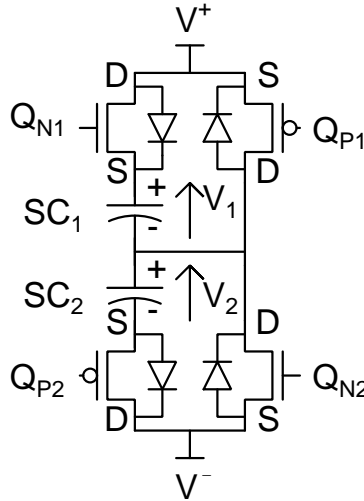


Figure 3.1 Schéma de la partie puissance d'une cellule de base comportant deux supercondensateurs.

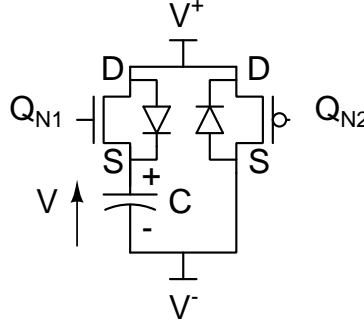


Figure 3.2 Schéma de la partie puissance d'une cellule de base comportant un seul supercondensateur.

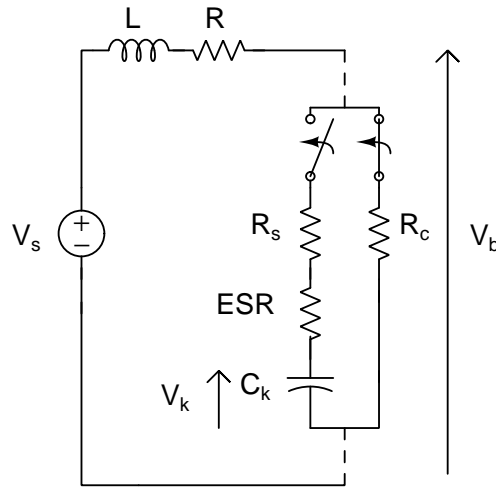


Figure 3.3 Schéma d'un assemblage série de N cellules de base comportant un supercondensateur avec une source de tension et une impédance Thévenin comprenant une résistance et une inductance.

supercondensateurs ne doivent pas se décharger en-dessous de 2 V afin de pouvoir garder le circuit de commande alimenté. Des protections, comparateurs et portes logiques, empêchent les supercondensateurs de se décharger si leurs tensions respectives descendent sous les 2 V. Dans une nouvelle version, la cellule ne contient qu'un seul supercondensateur, tel qu'illustré à la Figure 3.2, et est commandée exclusivement par des nMOS. Les pMOS ont une plus grande résistance $R_{DS(on)}$, d'où l'intérêt de les éliminer du montage.

3.2 Modèle du circuit

Le circuit équivalent d'un assemblage série de cellules de base à un supercondensateur est illustré à la Figure 3.3. Sur cette figure est aussi représenté l'équivalent Thévenin du circuit

externe sur lequel les N cellules sont raccordées. Sur cette Figure, $V_s(t)$ est la tension d'une source de tension externe, et L et R sont l'inductance et la résistance en série avec cette source de tension.

Chaque cellule k comprend un supercondensateur C_k avec sa résistance série équivalente ESR , ainsi que deux interrupteurs complémentaires contrôlés par la variable de commande S_{C_k} . Lorsque S_{C_k} vaut 1, le transistor en série avec le supercondensateur est passant, et sa résistance $R_{DS(on)}$ vaut R_s . Lorsque S_{C_k} vaut 0, le transistor qui sert à contourner le supercondensateur est passant et sa résistance $R_{DS(on)}$ vaut R_c .

Lors de la charge des supercondensateurs, $V_s(t)$ correspond à la tension de la source qui fournit l'énergie. L'inductance et la résistance L et R représentent l'inductance et la résistance Thévenin entre la branche de supercondensateurs et la source de tension. Lors de la décharge des supercondensateurs dans une charge passive, L et R représentent l'impédance de la charge, et $V_s(t)$ est considérée nulle.

Le nombre de supercondensateurs mis en conduction, i.e. connectés en série et contribuant à générer une tension aux bornes de la branche, est noté n . Comme S_{C_k} vaut 1 si le supercondensateur C_k est mis en conduction, n peut être évalué en faisant la somme des S_{C_k} :

$$n = \sum_{k=1}^N S_{C_k}. \quad (3.1)$$

La résistance totale R_b de la branche constituée de plusieurs cellules en série correspond à la somme des résistances séries de chacune des N cellules :

$$R_b = n(ESR + R_s) + (N - n)R_c. \quad (3.2)$$

La tension totale des supercondensateurs mis en conduction dans la branche, en fonction de la tension V_k d'un supercondensateur, vaut :

$$V_{tot} = \sum_{k=1}^N S_{C_k} V_k. \quad (3.3)$$

Grâce aux équations (3.1), (3.2) et (3.3) le circuit peut ainsi être simplifié, tel qu'illustré à la Figure 3.4.

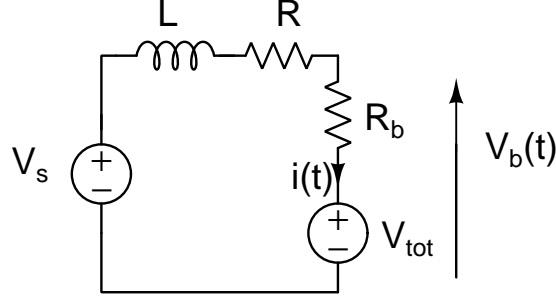


Figure 3.4 Modélisation de l'assemblage série de N cellules connectés en série avec une source de tension et une impédance Thévenin comprenant une résistance et une inductance.

3.3 Équations du circuit

En appliquant la loi des mailles sur le circuit équivalent de la Figure 3.4, on obtient :

$$V_s(t) - V_{tot}(t) = (R + R_b) i(t) + L \frac{di}{dt}(t),$$

i.e.

$$L \frac{di}{dt}(t) = V_s(t) - V_{tot}(t) - (R + R_b) i(t). \quad (3.4)$$

D'autre part, puisque l'équation constitutive d'un supercondensateur idéal est donnée par $i(t)S_{C_k} = C_k dV_k(t)/dt$, et connaissant à tout moment l'état S_{C_k} des interrupteurs de chaque cellule k , on peut écrire :

$$\frac{dV_k}{dt}(t) = \frac{S_{C_k}}{C_k} i(t). \quad (3.5)$$

Les équations (3.4) et (3.5) suffisent pour modéliser la dynamique de charge et décharge d'un système constitué de N supercondensateurs.

3.4 Discrétisation des équations différentielles

La méthode d'Euler est utilisée pour approximer les équations différentielles (3.4) et (3.5), toutes deux du premier ordre. La méthode d'Euler explicite permet de discrétiser la dérivée de la tension des supercondensateurs, i.e.

$$\frac{dV_k}{dt}(t) \approx \frac{V_k(t + \Delta t) - V_k(t)}{\Delta t}. \quad (3.6)$$

L'équation (3.5) devient donc :

$$V_k(t + \Delta t) \approx V_k(t) + i(t) \frac{S_{C_k} \Delta t}{C_k}. \quad (3.7)$$

La méthode d'Euler implicite permet de discrétiser la dérivée du courant dans le circuit, i.e.

$$\frac{di}{dt}(t + \Delta t) \approx \frac{i(t + \Delta t) - i(t)}{\Delta t}. \quad (3.8)$$

L'équation (3.4) devient donc :

$$\frac{Li(t + \Delta t)}{\Delta t} \approx \left[V_s(t + \Delta t) - V_{tot}(t + \Delta t) - (R + R_b) i(t + \Delta t) \right] + \frac{Li(t)}{\Delta t},$$

i.e.

$$i(t + \Delta t) \approx \frac{\frac{Li(t)}{\Delta t} + V_s(t + \Delta t) - V_{tot}(t + \Delta t)}{\frac{L}{\Delta t} + R + R_b}. \quad (3.9)$$

3.5 Algorithme de résolution temporel

A l'instant $t = 0$, les conditions initiales pour le courant, $i(0)$, et pour la tension des super-condensateurs, $V_k(0)$, sont posées, ainsi que l'état initial des interrupteurs S_{C_k} :

$$\begin{aligned} i(0) &= 0, \\ V_k(0) &= V_k^0, \quad \forall k \in [1, N], \\ S_{C_k} &= 0 \text{ ou } 1, \quad \forall k \in [1, N]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Puis, les différentes quantités sont calculées de manière séquentielle comme suit :

$$V_k(t + \Delta t) = i(t) \frac{S_{C_k} \Delta t}{C_k} + V_k(t) \quad , \quad \forall k \in [1, N], \text{ c.f. equ. (3.7),}$$

$$V_{tot} = \sum_{k=1}^N S_{C_k} V_k \quad , \quad \forall k \in [1, N], \text{ c.f. equ. (3.3),}$$

$$n = \sum_{k=1}^N S_{C_k} \quad , \quad \forall k \in [1, N] \text{ c.f. equ. (3.1),}$$

$$R_b = n(ESR + R_s) + (N - n)R_c \quad , \quad \forall k \in [1, N] \text{ c.f. equ. (3.2),}$$

$$i(t + \Delta t) = \frac{\frac{Li(t)}{\Delta t} + V_s(t + \Delta t) - V_{tot}(t + \Delta t)}{\frac{L}{\Delta t} + R + R_b} \quad , \quad \forall k \in [1, N] \text{ c.f. equ. (3.9).}$$

Enfin, à mesure que cela est nécessaire, l'algorithme de commande modifie l'état S_{C_k} des interrupteurs, en fonction de la valeur du courant $i(t)$ ou la tension V_b de la branche de supercondensateurs, définie par :

$$V_b(t) = V_{tot} + i(t)R_b. \quad (3.11)$$

3.6 Validation du modèle numérique

3.6.1 Simulation de la charge d'une cellule de base

Pour valider la modélisation, la simulation numérique d'une cellule de base a été faite et comparée à une solution analytique. Le circuit étudié correspond à celui de la Figure 3.5. Les valeurs sont $C_1 = 10 \text{ F}$, $R_s = R_c = 1 \text{ } \Omega$, et $ESR = 0.5 \text{ } \Omega$. La cellule est connectée à une source de tension : $V^+ - V^- = V_s = 15 \text{ V}$.

On désire charger le supercondensateur jusqu'à 5 V . Il est initialement totalement déchargé, donc $V_1(0) = 0 \text{ V}$, et aucun courant ne circule au départ : $i(0) = 0 \text{ A}$. Initialement, l'interrupteur $S_{C_1} = 1$ et il garde cette valeur tant que $V_1 \leq 5 \text{ V}$.

En appliquant la séquence d'évaluation donnée par (3.1), (3.2), (3.3), (3.7), (3.9), on obtient le résultat présenté à la Figure 3.6.

Analytiquement, la solution de $V_1(t)$ de ce circuit RC simple s'écrit :

$$V_1(t) = \begin{cases} V_s(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_b C_1}\right) \right] & \text{si } V_1(t) \leq 5 \text{ V,} \\ 5 \text{ V,} & \text{si } V_1(t) \geq 5 \text{ V.} \end{cases} \quad (3.12)$$

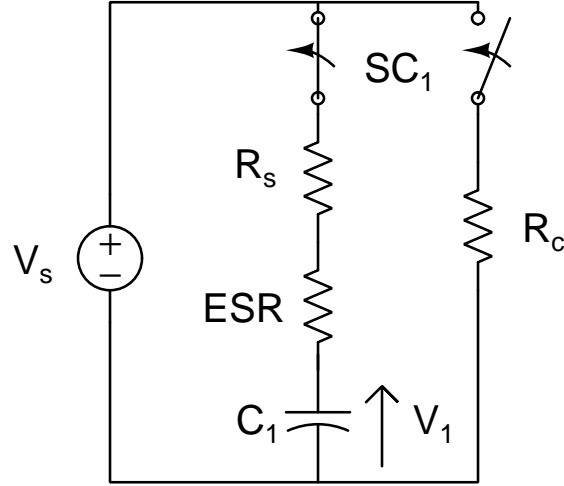


Figure 3.5 Circuit étudié lors de la simulation de la charge d'une cellule de base.

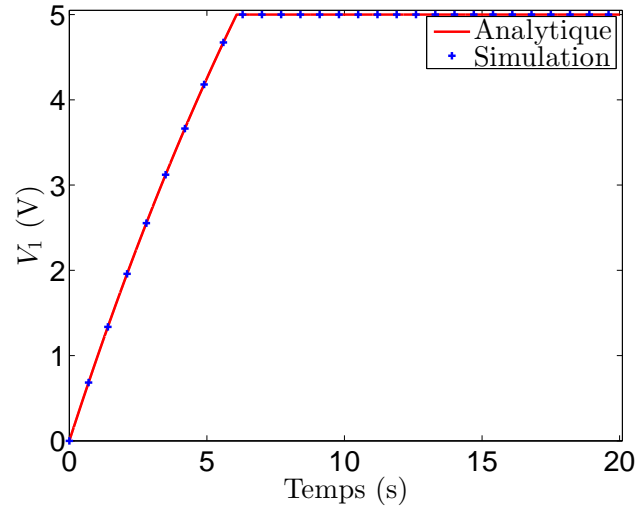


Figure 3.6 Résultats analytiques et numériques du problème de charge d'une cellule à un supercondensateur.

i.e.

$$V_2(t) = \begin{cases} 15 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{15}\right) \right] & \text{si } V_2(t) \leq 5 \text{ V,} \\ 5 \text{ V,} & \text{si } V_1(t) \geq 5. \end{cases}$$

Selon cette équation, le supercondensateur atteint 5 V à $t = 15 \times \ln(3/2) = 6.0819$ s. En simulation, avec un pas de temps de 1 ms, le supercondensateur atteint cette valeur pour $t = 6.082$ s, ce qui valide le cas de test.

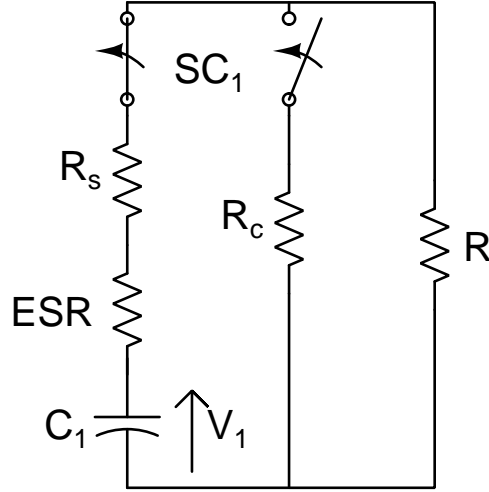


Figure 3.7 Circuit étudié lors de la simulation de la décharge d'une cellule de base.

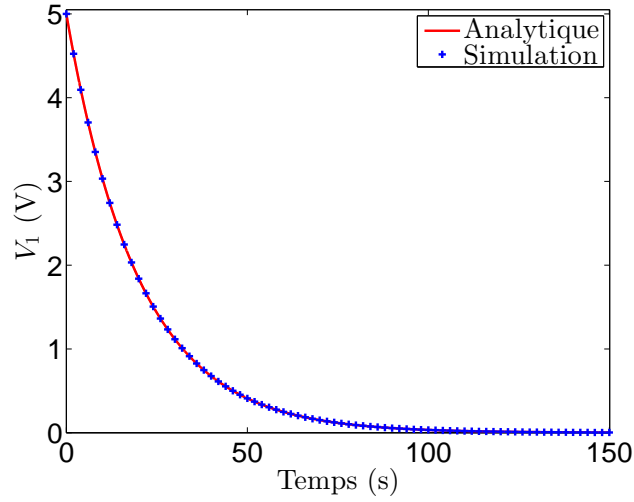


Figure 3.8 Résultats analytique et numérique du problème de décharge d'une cellule de supercondensateur.

3.6.2 Simulation de la décharge d'une cellule de base

La simulation numérique de la décharge d'une cellule de base a été faite et comparée à une solution analytique. Le circuit étudié correspond à celui de la Figure 3.7. Les valeurs sont $C_1 = 10 \text{ F}$, $R = R_s = R_c = ESR = 0.5 \Omega$ et $L = 0 \text{ H}$.

On désire décharger le supercondensateur. Il est initialement chargé, donc $V_1(0) = 5 \text{ V}$, et aucun courant ne circule au départ : $i(0) = 0 \text{ A}$. Initialement, l'interrupteur $S_{C_1} = 1$ et il garde cette valeur tant que $V_1 \geq 0 \text{ V}$.

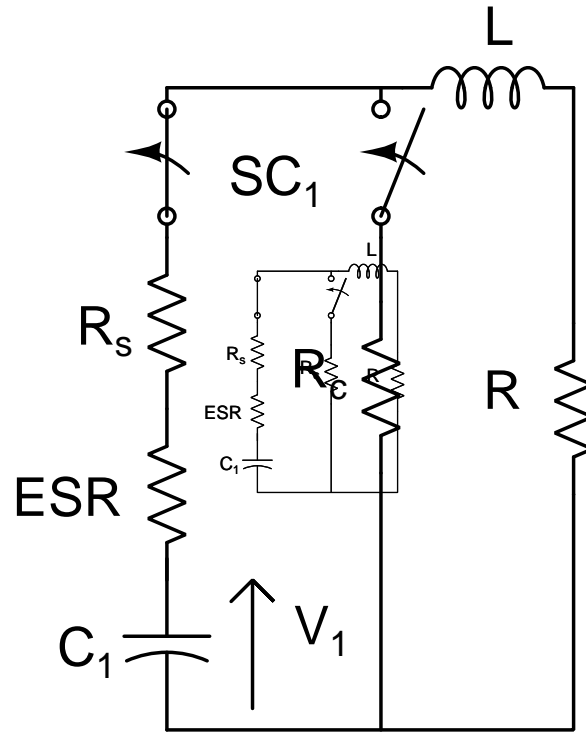


Figure 3.9 Circuit étudié lors de la simulation de la décharge d'une cellule de base avec une charge inductive.

Analytiquement, la solution l'équation différentielle de $V_1(t)$ s'écrit :

$$V_b(t) = V_1(0) \exp\left(\frac{-t}{(R + R_b)C}\right). \quad (3.13)$$

En appliquant la séquence d'évaluation donnée par (3.1), (3.2), (3.3), (3.7), (3.9), on obtient le résultat présenté à la Figure 3.8. Les deux courbes sont confondues, la simulation est donc validée.

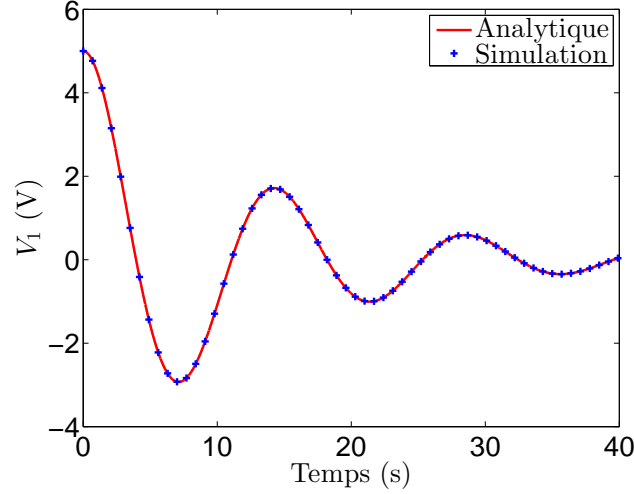


Figure 3.10 Résultats analytiques et numériques du problème de décharge d'une cellule de supercondensateur avec une charge inductive.

3.6.3 Simulation de la décharge d'une cellule de base avec une charge purement inductive

La simulation numérique de décharge d'une cellule de base avec une charge inductive a été réalisée et comparée à une solution analytique. Le circuit étudié correspond à celui de la Figure 3.9. Les valeurs sont : $R_s = R_c = 0.1 \Omega$, $ESR = 0.05 \Omega$, $L = 1 \text{ H}$, $R = 0$, $C_1 = 5 \text{ F}$. On désire décharger le supercondensateur. Il est initialement chargé, donc $V_1(0) = 5 \text{ V}$, et aucun courant ne circule au départ : $i(0) = 0 \text{ A}$. Initialement, l'interrupteur $S_{C_1} = 1$ et il garde cette valeur tant que $V_1 \geq 0 \text{ V}$.

Analytiquement, l'équation différentielle de $V_1(t)$ s'écrit :

$$LC_1 \frac{d^2 V_1}{dt^2} + (R + R_b)C_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 = 0, \quad (3.14)$$

et la solution analytique s'écrit :

$$V_1(t) = \frac{-V_1(0)\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \exp(\lambda_1 t) + \frac{V_1(0)\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \exp(\lambda_2 t),$$

avec λ_1 et λ_2 les racines du discriminant $\Delta = ((R + R_b)C_1)^2 - 4(LC_1)$, i.e. :

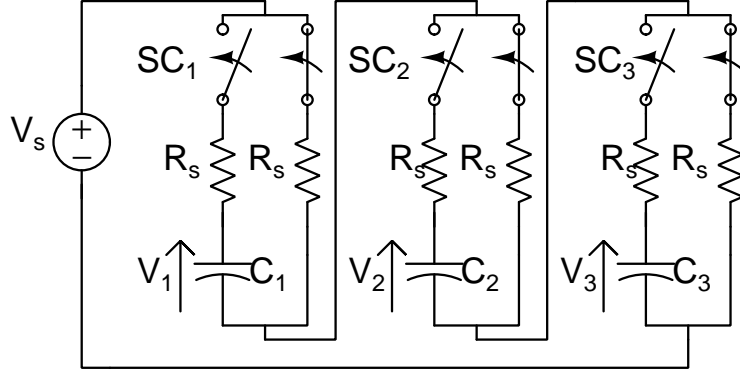


Figure 3.11 Circuit étudié lors de la simulation de la charge de trois cellules de base.

$$\lambda_1 = \frac{-(R + R_b)C_1 + \sqrt{\Delta}}{2LC_1},$$

$$\lambda_1 = \frac{-(R + R_b)C_1 - \sqrt{\Delta}}{2LC_1}.$$

En appliquant la séquence d'évaluation donnée en (3.1), (3.2), (3.3), (3.7), (3.9), on obtient le résultat présenté à la Figure 3.10. Les deux courbes sont confondues, la simulation est donc validée.

3.6.4 Simulation de la charge de trois cellules de base

Cette étape est réalisée afin de valider que la commande des interrupteurs, telle que programmée, fonctionne bien. Trois cellules sont donc chargées l'une après l'autre. Initialement, l'interrupteur $SC_1 = 1$ tant que $V_1 \leq 5$ V, tandis que $SC_2 = 0$ et $SC_3 = 0$. Lorsque la valeur de SC_1 passe à zéro, c'est SC_2 que l'on ferme ($SC_2 = 1$), tant que $V_2 \leq 5$ V. Enfin, lorsque $SC_2 = 0$, $SC_3 = 1$ tant que $V_3 \leq 5$ V.

Le circuit étudié correspond à celui de la Figure 3.11. Les valeurs sont : $C_k = 10$ F, $R_{s_k} = R_{c_k} = 0.5 \Omega \forall k \in [1, 3]$ et $ESR = 0 \Omega$. Les cellules sont connectées à une source de tension $V_s(t) = 15$ V.

Les valeurs du circuit ont été choisies afin que le problème puisse être comparé à la charge d'une seule cellule, répétée trois fois. La tension maximale est atteinte à $t_f = -15 \ln(2/3) = 6.081$ s. La tension aux bornes de la branche de supercondensateurs vaut alors :

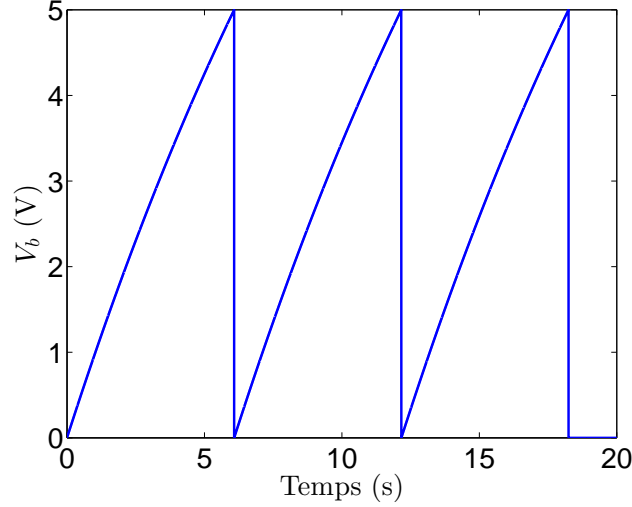


Figure 3.12 Résultat numérique du problème de charge de trois cellules de supercondensateur.

$$V_b(t) = \begin{cases} V_s(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_b C_1}\right) \right] & \text{si } t \leq t_f, \\ V_s(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-(t - t_f)}{R_b C_2}\right) \right] & \text{si } t_f \leq t \leq 2t_f, \\ V_s(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-(t - 2t_f)}{R_b C_3}\right) \right] & \text{si } 2t_f \leq t \leq 3t_f. \end{cases}$$

Le résultat de la simulation se trouve à la Figure 3.12. Les trois charges des supercondensateurs sont présentes. La simulation des interrupteurs est donc fonctionnelle.

3.6.5 Simulation de la décharge de trois cellules de base

Les interrupteurs sont aussi testés en décharge. Dans ce cas, l'objectif est de valider la commande des interrupteurs : la tension aux bornes de la branche de supercondensateur doit respecter une consigne en tension. Les valeurs sont : $R = 100 \, \Omega$, $R_s = R_c = ESR = 0.5 \, \Omega$ et $C_k = 10 \, \text{F}$. Le circuit est illustré à la Figure 3.13. Lors de la décharge, les tensions des trois supercondensateurs servent de palliers afin de créer une forme de tension aux bornes de la branche $V_b(t)$. La consigne est une sinusoïde redressée de fréquence 0.1 Hz et d'amplitude 15 V. Initialement, les interrupteurs $S_{C_k} = 0$, $V_k = 5 \, \text{V}$, $\forall k \in [1, 3]$ et $i(0) = 0$

La résistance de la charge est grande, et il est impossible de voir les supercondensateurs se décharger sur la Figure 3.14. Cependant, la simulation des interrupteurs est correcte, car le

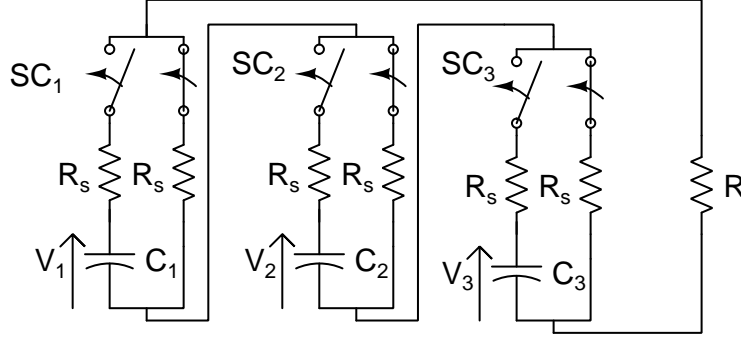


Figure 3.13 Circuit étudié lors de la simulation de la décharge de trois cellules de base.

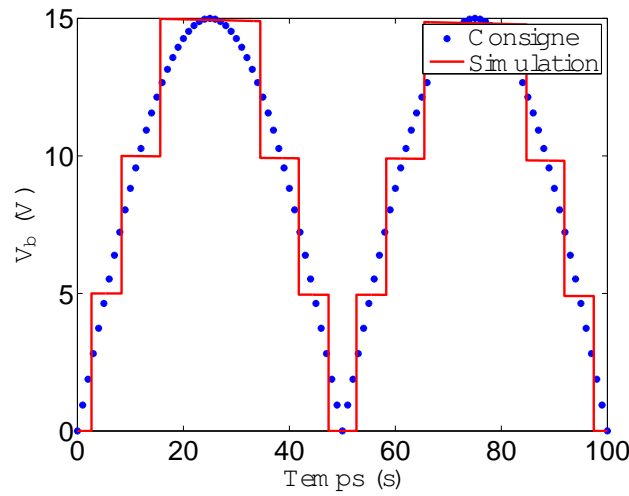


Figure 3.14 Consigne et résultats numériques du problème de décharge de trois cellules de supercondensateur.

résultat de la simulation est un sinus redressé de 15 V, de fréquence 0.1 Hz discrétisé par paliers de 5 V.

3.7 Modèle des supercondensateurs

Lors de la fabrication, les supercondensateurs n'ont pas tous la même capacité. Celle-ci peut varier de $\pm 20\%$, ce qui est non négligeable pour une capacité initiale de 350 F ou 3400 F. Lors des simulations, il est préférable de choisir des capacités différentes pour les supercondensateurs afin de mettre en évidence le problème d'égalisation de la tension mentionnée dans la revue de littérature. La loi normale a été choisie, car elle est la plus adaptée pour recréer les phénomènes aléatoires durant la fabrication de supercondensateurs. Si une quantité importante de supercondensateurs était triée par capacité après leur fabrication, le nombre

de supercondensateurs en fonction de la capacité donnerait une courbe normale, centrée sur la capacité moyenne de la production. Pour la simulation, un nombre N de supercondensateurs est choisi de manière à former la loi normale centrée avec un écart type de 10% lorsqu'ils sont triés par capacité. Les capacités sont ensuite assignées de manière aléatoire aux supercondensateurs.

Sur les Figures 3.15 et 3.16, sont représentés le nombre de supercondensateurs selon leur capacités. Pour de grands nombres comme sur la Figure 3.16, la répartition suit de manière plus précise la loi normale. En effet, plus le nombre de supercondensateurs est important, plus la courbe du nombre de supercondensateurs en fonction de leur capacité s'approchera de la loi normale centrée.

3.8 Résumé

Dans ce chapitre, une modélisation des supercondensateurs et des transistors a permis de modéliser les cellules de SUPERCAPS. Avec plusieurs mises sous équations et simulations, les modèles des supercondensateurs et de la commande des interrupteurs, ont été validés. Comme il est possible de gérer des formes sinusoïdales, un estimé de transformée de Fourier a été faite sur un sinus discrétisé par paliers de tension V_i , d'amplitude A et de fréquence f . Lors des simulations dans ce chapitre, les supercondensateurs ont tous la même capacité. Ce n'est pas le cas expérimentalement. Pour simuler les supercondensateurs au plus proche de la réalité, un choix aléatoire respectant la loi normale centrée a été introduit. Ce modèle sera utilisé pour assigner les capacités des supercondensateurs dans les simulations.

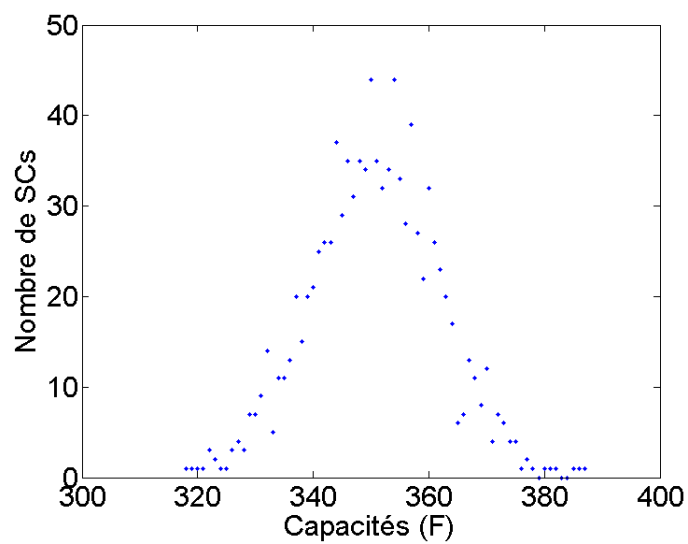


Figure 3.15 Nombre de supercondensateurs en fonction de leur capacité pour 1000 supercondensateurs.

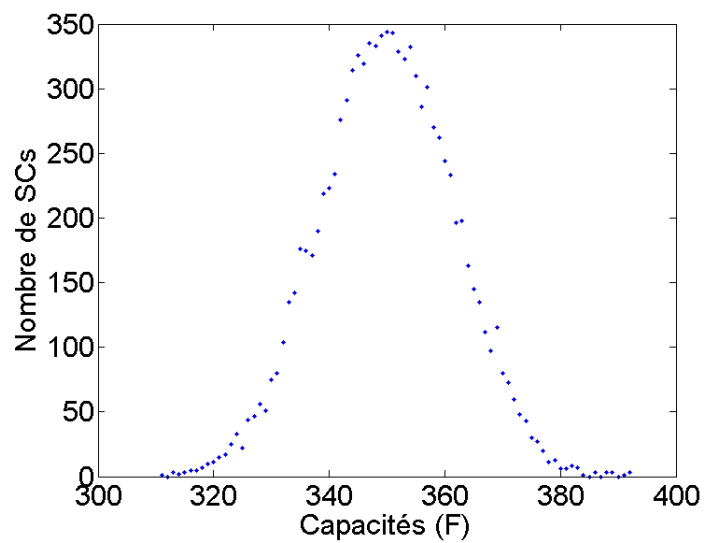


Figure 3.16 Nombre de supercondensateurs en fonction de leur capacité pour 10000 supercondensateurs.

CHAPITRE 4 ALGORITHMES DE COMMANDE DES SUPERCONDENSATEURS CONNECTÉS EN SÉRIE EN ÉGALISANT LEUR TENSION

4.1 Simulation numérique du système complet

Dans ce chapitre, les résultats des simulations avec les supercondensateurs de 3400 F présentent les capacités d'un convertisseur de puissance constitué de cellules SUPERCAPS pour une utilisation à pleine échelle. Les simulations avec des supercondensateurs de 350 F ne servent qu'à être comparées avec le comportement du système réel. Les simulations ont été faites avec un script Matlab. L'algorithme de commande du modèle est la prise de décision qui se base sur le comportement du modèle. La figure 4.1, présente de façon simplifiée la structure du script Matlab. En effet, à l'état initial, le premier incrément ne comprend aucun supercondensateur en conduction. À partir de cet état, l'état physique est déterminé en se basant sur le modèle physique : la résistance équivalente et la tension de la branche sont déterminées, puis le courant circulant dans la branche et la tension aux bornes de la charge. Une fois ces paramètres connus, l'algorithme de commande prend une décision. Puis l'état des interrupteurs change et les paramètres physiques sont de nouveau déterminés, etc.

4.2 Algorithmes lors de la décharge des supercondensateurs de 3400 F

4.2.1 Introduction

Les résultats présentés dans cette section sont réalisés avec 200 supercondensateurs de 3400 F dont l' ESR est de $0.28 \text{ m}\Omega$. Les résistances R_s et R_c sont respectivement $0.4 \text{ m}\Omega$ et $0.8 \text{ m}\Omega$. Le pas de temps de la simulation est de $3 \mu\text{s}$. L'inductance connectée en série à la branche vaut $0.1 \mu\text{H}$ et la charge 0.5Ω .

Le but est d'alimenter une charge à une certaine tension, la tension de consigne $V_{consigne}$. Afin d'assurer une certaine stabilité, le système adapte la commande en temps réel à toutes

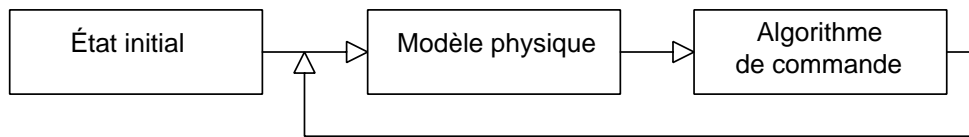


Figure 4.1 Modèle pour la simulation sous Matlab.

les $3 \mu s$ en fonction V_{charge} de la tension à la charge, ou de la tension V_b de la branche et de la tension de consigne $V_{consigne}$. Le système peut donc être assimilé à un système bouclé tel qu'illustré à la Figure 4.1. Cela permet aussi au système de produire n'importe quelle forme d'onde de tension.

Puisqu'un supercondensateur chargé possède ici une tension de 2.7 V, le système ne peut pas être plus précis que par incrément de 2.7 V.

Sur de très grande tensions, de l'ordre du kV, 2.7 V est une résolution convenable.

Dans le cas des signaux alternatif, les courbes présentées sont sinusoïdales. Dans la réalité, un pont en H quatre quadrants est utilisé afin d'inverser la polarité de la branche de supercondensateurs. Cependant il n'est pas implémenté dans la simulation. Les calculs sont réalisés depuis les tensions positives ou négatives. Les transformées discrète de Fourier sont faites sur des signaux avec des tensions ou des courants positifs et négatifs.

Enfin, plusieurs algorithmes ont été proposés. Suite à une analyse, un seul a été retenu.

4.2.2 Répartition par mouvement circulaire

Le nombre n de supercondensateurs mis en conduction qui est nécessaire pour générer la tension désirée à la charge est calculé à chaque itération. Soit un vecteur S de taille n . L'indice i du vecteur S correspond au $i^{\text{ème}}$ supercondensateur présent physiquement dans le système. Si celui-ci est mis en conduction, $S(i) = 1$, sinon $S(i) = 0$. Soit a , le pointeur vers l'indice du premier supercondensateur mis en conduction. À chaque incrément, le nombre n de supercondensateurs mis en conduction peut changer, selon la tension ou l'état de décharge des supercondensateurs. Au bout d'un certain pas de temps, le pointeur a est incrémenté. Ainsi, les supercondensateurs se déchargent peu à peu, tous au même rythme.

Le vecteur d'état S est illustré à la Figure 4.2. Le vecteur de N cases correspondant au nombre de supercondensateurs présents physiquement est illustré à gauche de la Figure 4.2. Il ne contient que des 0. Ce vecteur peut être illustré comme un anneau en connectant la $N^{\text{ème}}$ case avec la première, tel qu'illustré à droite de la Figure 4.2. En foncé est le vecteur de taille n correspondant au nombre de supercondensateurs mis en conduction. Il ne contient que des 1. Lors de l'incrément d'un supercondensateur, le vecteur foncé de n indices, possède un indice de plus. Lors de l'incrément du pointeur a , ce même vecteur débute à l'indice suivant. En d'autres termes, si a est incrémenté, $S(a - 1) = 0$ et $S(a + n) = 1$.

Lorsque $a + n = N$, le prochain supercondensateur activé sera à l'indice 1. Par conséquent il est possible d'imaginer le vecteur comme un vecteur circulaire où le dernier indice est connecté au premier indice du vecteur.

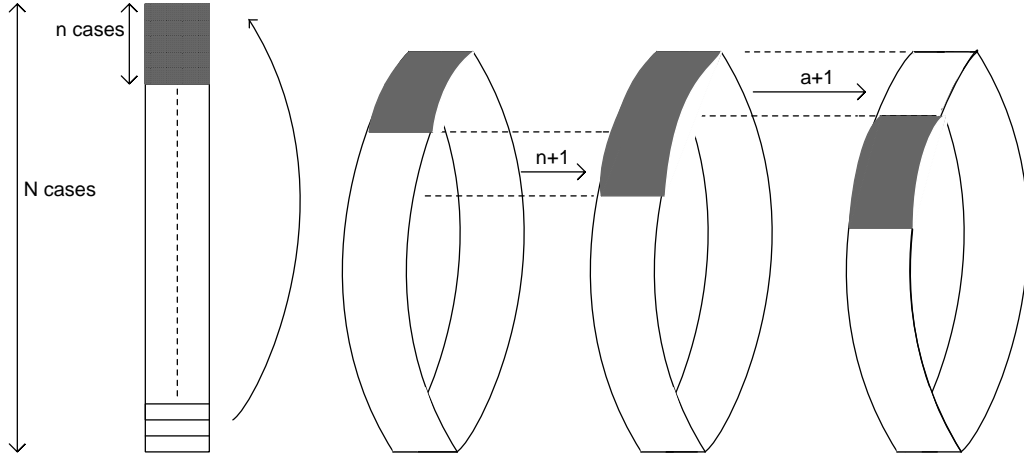


Figure 4.2 Illustration du changement dans le vecteur S avec l'algorithme de mouvement circulaire.

Sur la Figure 4.3 est illustré l'algorithme de décharge des supercondensateurs. La tension à la charge est comparée à la tension de consigne à chaque pas de temps. Ainsi, toute forme d'onde de tension dont le "slew-rate" est inférieur à $(1.35/3 \mu s) = 0.45 \text{ V} \mu \text{ s}^{-1}$ pourra être produite.

Le script Matlab dispose également de conditions qui permettent de ne pas dépasser le nombre de supercondensateurs disponibles et de ne pas dépasser la valeur maximale du pointeur a .

4.2.3 Alimentation d'une charge en continu

Le tableau 4.1 résume les paramètres de simulation. Sur la Figure 4.4 est représenté la tension de consigne $V_{consigne}$ et la tension aux bornes de la branche V_b . La répartition de la tension dans les supercondensateurs se trouve sur la Figure 4.5. La tension moyenne des supercondensateurs ainsi que l'écart maximum de tension entre les supercondensateurs sont représentés au cours du temps.

Au début de la simulation, aucun supercondensateur n'est mis en conduction. Tant que la tension de la branche n'est pas comprise entre $V_{consigne} - 1.35 \text{ V}$ et $V_{consigne} + 1.35 \text{ V}$, le système réagit en ajoutant des supercondensateurs. Comme le pas de temps de simulation est rapide ($3 \mu s$) le temps de montée du système est rapide : il est visible à l'instant 0 de la courbe de la tension à la charge. Une fois que le système a atteint son objectif, une légère pente de décharge est visible. En effet, le courant qui alimente la charge dans cette simulation est de 400 A . Après la phase de montée de tension, le système n'ajoute plus de supercondensateurs mais l'algorithme de mouvement circulaire les fait se décharger à tour de rôle grâce à l'incrément du premier supercondensateur mis en conduction dans le vecteur

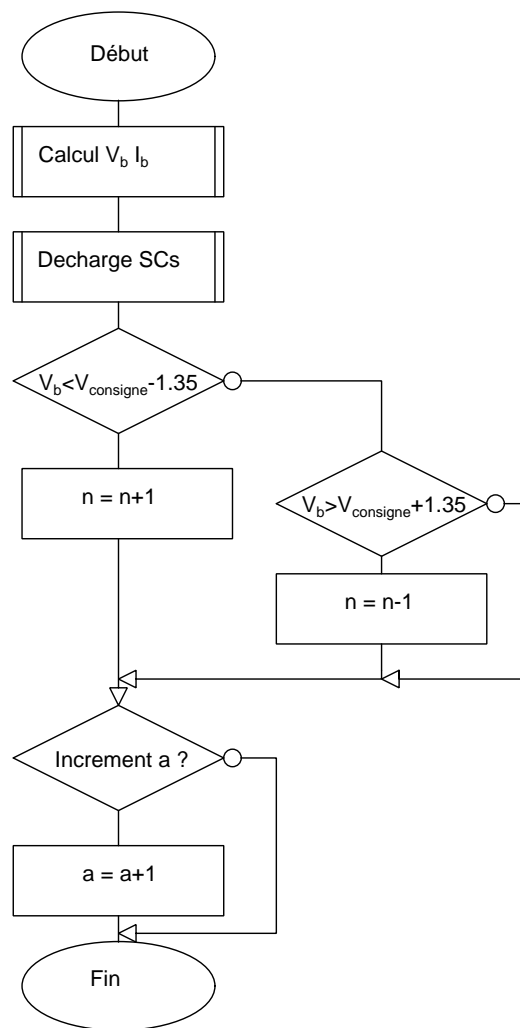


Figure 4.3 Algorithme de décharge par mouvement circulaire des SCs.

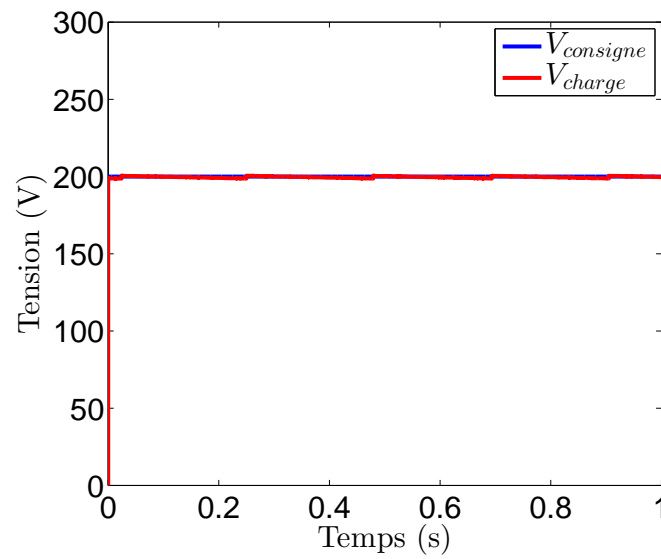


Figure 4.4 Alimentation d'une charge en CC avec l'algorithme de mouvement circulaire pour des supercondensateurs de 3400 F.

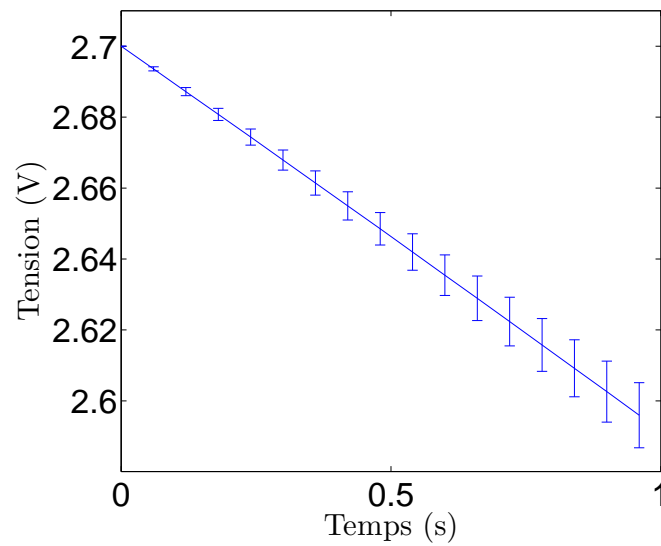


Figure 4.5 Répartition de la tension dans les supercondensateurs de 3400 F lors d'une charge à partir d'une source de tension continue.

Tableau 4.1 Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	200	-
V_{initial}	2.7	V
V_s	0	V
R	0.2	Ω
L	0.1	μH
V_{consigne}	200 ± 1.35	V

d'état S .

Afin de vérifier si la tension à la charge est correcte, une transformée de Fourier a été réalisée sur la Figure 4.6. Cette analyse permet aussi de dimensionner, si requis, des filtres.

La transformée discrète de Fourier d'un signal continu et de la tension à la charge sont confondues.

4.2.4 Alimentation d'une charge en alternatif

Le tableau 4.2 résume les paramètres de simulation.

La Figure 4.7 présente la tension de consigne V_{consigne} et la tension aux bornes la branche de supercondensateur V_b . La Figure 4.8 présente la répartition des tensions des supercondensateurs au cours du temps.

À cette échelle, les courbes sont totalement confondues. À l'état initial, aucun supercondensateur n'est mis en conduction dans la branche. Comme le signal est alternatif, le nombre de supercondensateur mis en conduction dans la branche varie plus ou moins rapidement selon la dérivée du sinus.

La variation du nombre de supercondensateurs mis en conduction se déroule en même temps que l'incrément du numéro du premier supercondensateur mis en conduction i.e. l'index a . Dans cette simulation, le courant maximum est de 400 A. Comme l'inductance en série avec la branche vaut 0.1 μH , la charge est majoritairement résistive et la courbe du courant est aussi une sinusoïde de fréquence 60 Hz et d'amplitude 400 A_{PEAK} .

Les supercondensateurs se déchargent moins vite qu'en continu, ce qui est normal car il y a moins d'énergie fournie à la charge. La répartition des tensions des supercondensateurs, à la Figure 4.8 est tout à fait convenable : à tout moment, tous les supercondensateurs ont la même tension à ± 0.5 mV près. Afin de vérifier si la tension à la charge est correcte, une transformée de Fourier a été réalisée à la Figure 4.9. Dans ce cas, la transformée discrète de Fourier de la tension à la charge ainsi que d'un sinus parfait semblent être confondues.

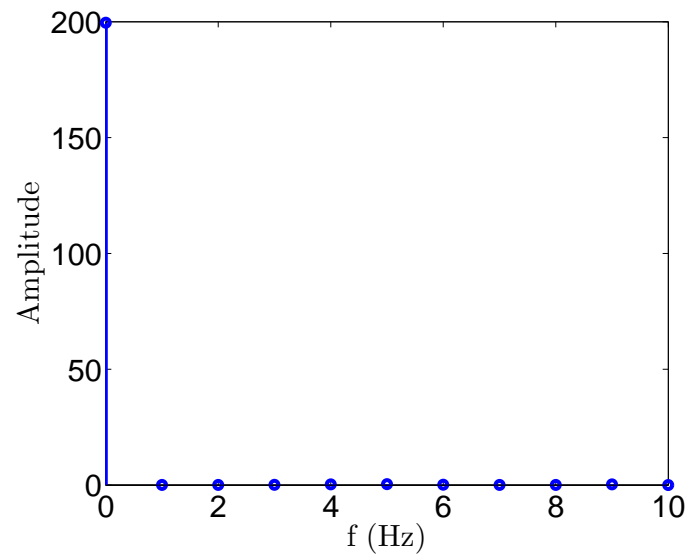


Figure 4.6 Transformée discrète de Fourier de la tension à la charge et d'un signal continu pour des supercondensateurs de 3400 F.

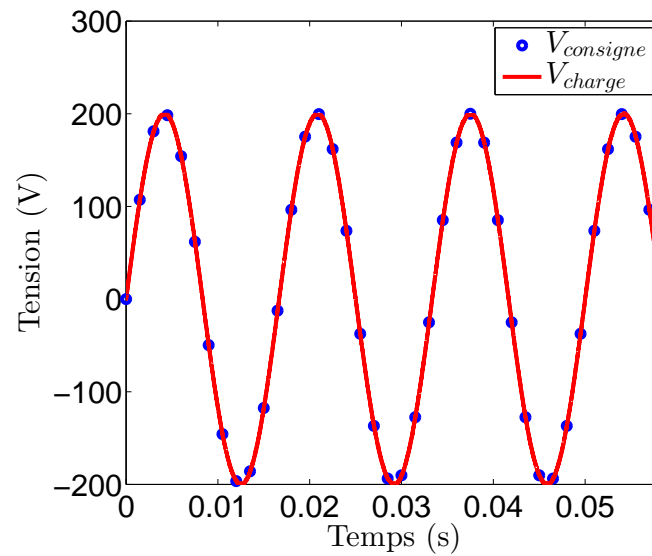


Figure 4.7 Alimentation d'une charge en CA avec l'algorithme de mouvement circulaire circulaire pour des supercondensateurs de 3400 F.

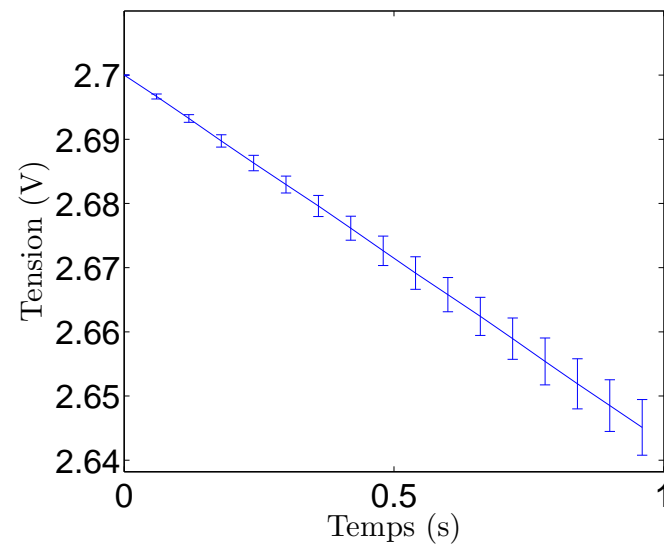


Figure 4.8 Répartition de la tension dans les supercondensateurs de 3400 F lors d'une charge.

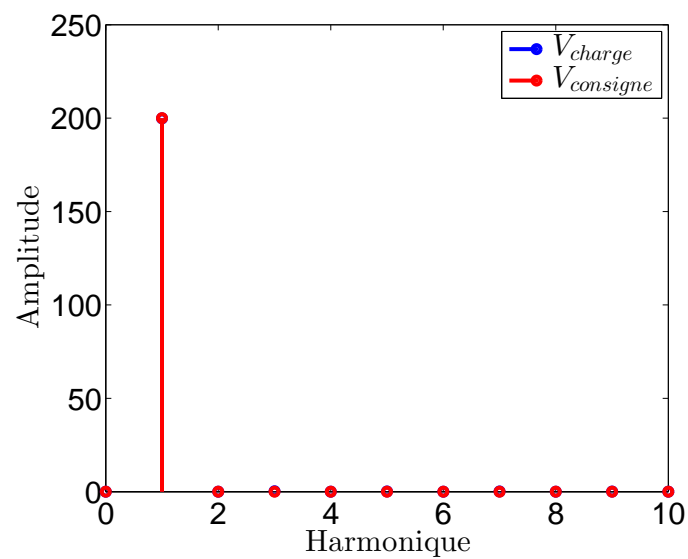


Figure 4.9 Transformée discrete de Fourier de la tension à la charge pour des supercondensateurs de 3400 F.

Tableau 4.2 Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	200	-
V_{initial}	2.7	V
V_s	0	V
R	0.2	Ω
L	0.1	μH
V_{consigne}	200 ± 1.35	V
f	60	Hz

4.3 Algorithmes lors de la charge des supercondensateurs de 3400 F

Les résultats présentés dans cette section sont réalisés avec des supercondensateurs de 3400 F, d'ESR 0.28 m Ω . Les résistances R_s et R_c sont respectivement 0.4 m Ω et 0.8 m Ω . Le pas de temps de la simulation est de 3 μs . L'inductance connectée en série à la branche vaut 0.1 μH .

Pour la charge, le système est également bouclé. Contrairement à la décharge où la commande est en tension, dans le cas de la charge c'est le courant qui est important.

Dans le cas de la charge des supercondensateurs, c'est la forme d'onde du courant qui est contrôlée, indépendamment de la forme de la tension de la source. C'est-à-dire, pour les cas les plus classiques : pour une tension de source sinusoïdale, on peut contrôler la charge des supercondensateurs en courant continu ou en courant alternatif. De même, pour une tension de source continue, on peut contrôler le courant de charge des supercondensateurs en continu. Ces différents cas sont présentés ci-dessous.

La Figure 4.10 illustre l'algorithme de charge des supercondensateurs. Le script Matlab dispose également de conditions qui permettent de ne pas dépasser le nombre de supercondensateurs disponible et de ne pas dépasser la valeur maximale du pointeur a .

Il y aura des sauts de courant dus à l'ajout d'un supercondensateur et de sa résistance (R_s ou R_c plus ESR). Ces sauts de courant ne doivent pas rendre la commande instable en faisant osciller le courant de branche I_b autour du courant de consigne I_{consigne} . Pour cela, il est possible de borner la consigne en courant pour accepter ces sauts autour de la valeur de consigne.

En simplifiant le modèle, l'écart de courant maximum sera la tension la plus grande d'un supercondensateur et de la résistance équivalente la plus petite, soit autant de $R_{DS(on)}$ du MOSFET de type N qu'il y a de supercondensateurs dans la boucle. Un des plus petit saut de courant sera la tension maximale d'un supercondensateur et la résistance la plus grande, soit autant de $R_{DS(on)}$ du MOSFET de type P et d'ESR qu'il y a de supercondensateurs dans

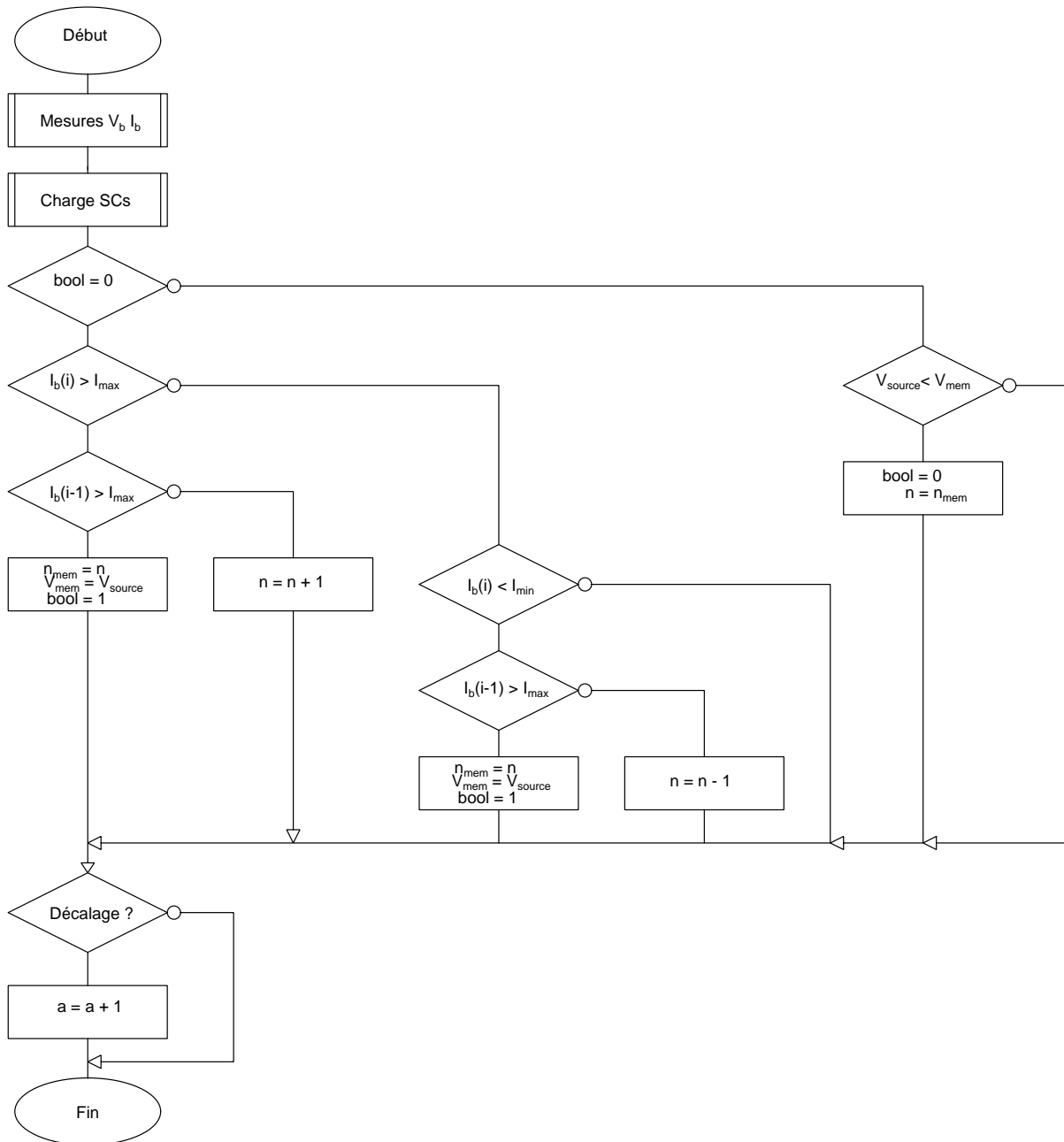


Figure 4.10 Algorithme de charge des supercondensateurs.

la boucle soit 14 A pour $N = 200$ supercondensateurs présents dans la boucle.

À partir de ces deux écarts de courant, il est possible de faire une moyenne de ces écarts. C'est une approximation d'un écart de courant. La mesure du courant devra être comprise entre la consigne plus ou moins la moitié de cet écart. La consigne a la forme d'onde désirée. En tout temps, le système bouclé cherche à respecter la consigne. Afin de mieux comprendre l'algorithme, il est possible de différencier certains cas :

- le cas où la somme des tensions des supercondensateurs ne suffit pas à créer une différence de tension entre la source et la branche de supercondensateur assez faible pour avoir un courant respectant la consigne
- le cas où la somme des tensions des supercondensateur suffit à créer une différence de tension qui permet de respecter la consigne de courant.

Dans le premier cas, si le courant devient trop élevé et que tous les supercondensateurs sont en série dans la branche, l'algorithme garde en mémoire la valeur de la tension de source à ce moment précis et le pont en H déconnecte la branche de supercondensateurs de la source. Aucun courant ne circulera donc dans la branche. Le pont en H ne laissera de nouveau passer le courant que lorsque la tension atteindra à nouveau cette valeur. Ce cas n'arrivera pas avec une source de tension CC. Il faudra mieux dimensionner le nombre de supercondensateurs. La valeur de la tension de la source à partir de laquelle le pont en H se déconnecte va changer avec le temps. En effet, en se chargeant, la somme des tensions des supercondensateurs augmente, donc la différence de tension avec la source diminue. Il y a un moment où les supercondensateurs sont assez chargés pour arriver dans le deuxième cas : la somme suffit à créer une différence de tension qui permet d'avoir un courant qui satisfait la consigne en courant.

4.3.1 Charge des supercondensateurs à partir d'une source alternative

Charge à courant continu

Le tableau 4.3 résume les paramètres de simulation.

Lors de cette simulation, 200 supercondensateurs initialement chargés à 1.5 V se chargent à partir d'une source de tension de 200 V à 60 Hz. La consigne est à courant continu de 400 A. La Figure 4.11 présente le courant I_b circulant dans la branche. Dans cette simulation, le courant I_b doit être continu dans les supercondensateurs.

Lorsque la différence de tension entre la source et la branche de supercondensateur est trop faible pour respecter la consigne en courant, aucun supercondensateur n'est mis en conduction. Le courant reste visible à ce moment là sur la figure, mais n'est conduit que par les

Tableau 4.3 Valeurs des paramètres lors d’une recharge à partir d’une source CA avec un courant CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	200	-
V_{initial}	1.5	V
V_s	200	V
f	60	Hz
R	0	Ω
L	0.1	μH
I_{consigne}	400 ± 11	A

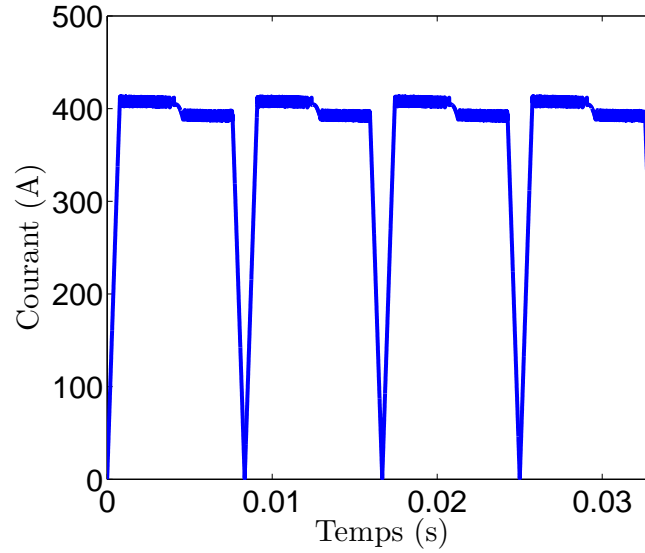


Figure 4.11 Courant circulant dans la branche de supercondensateurs pour une charge à courant constant avec une source de tension alternative.

transistors de contournement et ne circule donc pas dans les supercondensateurs.

La répartition de la tension des supercondensateurs durant cette simulation est représentée à la Figure 4.12. La tension de tous les supercondensateurs augmente avec le temps. À tout moment, toutes les tensions des supercondensateurs sont équilibrées.

Le courant vient donc de la différence de tension entre la source V_s et la branche de supercondensateurs V_b . Les tensions sont représentées sur la Figure 4.13 i.e. la tension de la source V_s et la tension de la branche de condensateurs V_b . Pour avoir un courant constant, la différence de tension entre la source et la branche n’est pas forcément constante car l’ajout dans la boucle de puissance d’un supercondensateur ajoute également une résistance (ESR).

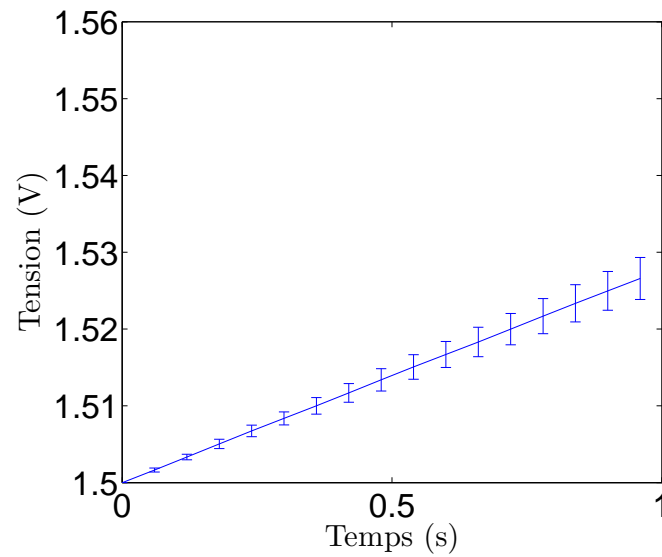


Figure 4.12 Répartition de la tension des supercondensateurs pour une charge à courant constant avec une source de tension alternative.

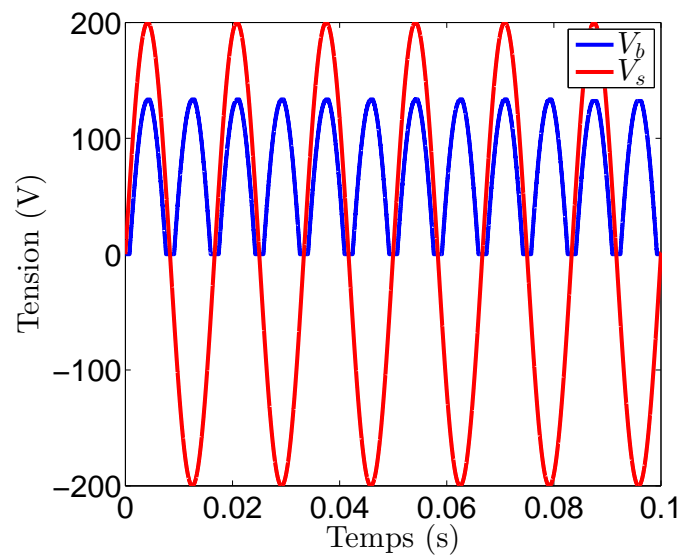


Figure 4.13 Tensions des supercondensateurs lors de la charge à courant continu avec des SCs de 3400 F

Charge à courant alternatif

Le tableau 4.4 résume les paramètres de simulation.

La Figure 4.14 représente le courant I_b circulant dans la branche. Dans cette simulation, le courant I_b doit être une sinusoïde redressée. La répartition de la tension des supercondensateurs durant cette simulation est représentée à la Figure 4.15. La tension de tous les supercondensateurs augmente avec le temps. À tout moment, toutes les tensions des supercondensateurs sont équilibrées.

Une Transformée Discrète de Fourier a été faite afin de quantifier la forme d'onde du courant I_b . La Figure 4.16 présente la TDF du courant, ainsi que celle d'un sinus redressé.

4.3.2 Charge des supercondensateurs à partir d'une source continue

Le tableau 4.5 résume les paramètres de simulation.

Sur la figure 4.17 est représenté le courant circulant dans la branche I_b , lors de la charge des supercondensateurs à partir d'une source de tension continue. La répartition de la tension des supercondensateurs est présentée à la Figure 4.18.

4.4 Algorithmes lors de la décharge des supercondensateurs 350 F

Dans cette section, les courbes présentées sont réalisées avec 6 supercondensateurs de 350 F, d'ESR 3.2 m Ω . Les résistances R_s et R_c sont respectivement de 2.4 m Ω et 4.1 m Ω , comme dans les cellules existantes sur lesquelles seront effectués les essais. Le pas de temps de la simulation est de 1 ms. L'inductance connectée en série à la branche est considérée comme nulle. La charge résistive vaut 10 Ω .

4.4.1 Alimentation d'une charge en continu : 10 V

Le tableau 4.6 résume les paramètres de simulation.

La tension de consigne $V_{consigne}$ et la tension de la branche de supercondensateurs V_b sont représentées sur la Figure 4.19. Le saut de tension de 2.7 V est plus visible sur cette simulation car l'échelle est plus faible dû à la consigne de 10 V. La tension de la branche V_b , respecte bien ± 1.35 V, soit la moitié de la tension maximale d'un supercondensateur, autour de la tension de consigne. La répartition de la tension des supercondensateurs au cours du temps lors de cette simulation est représentée à la Figure 4.20. Le mouvement circulaire du premier supercondensateur mis en conduction permet à tous les supercondensateurs de se décharger

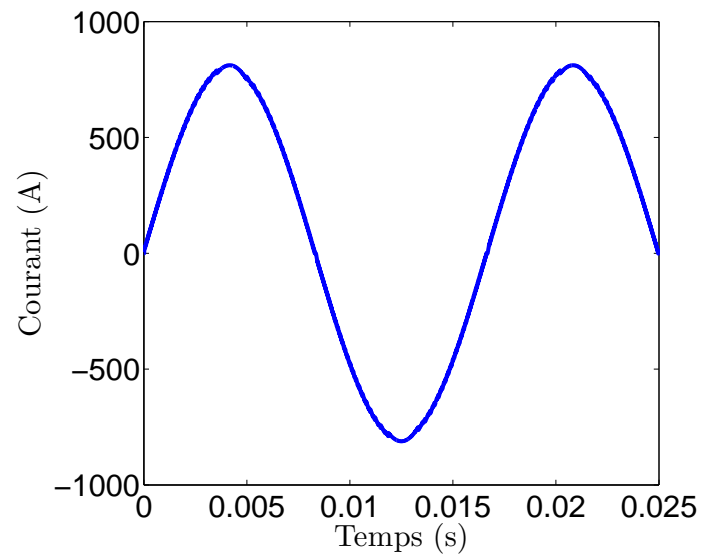


Figure 4.14 Courant de la source de tension alternative .

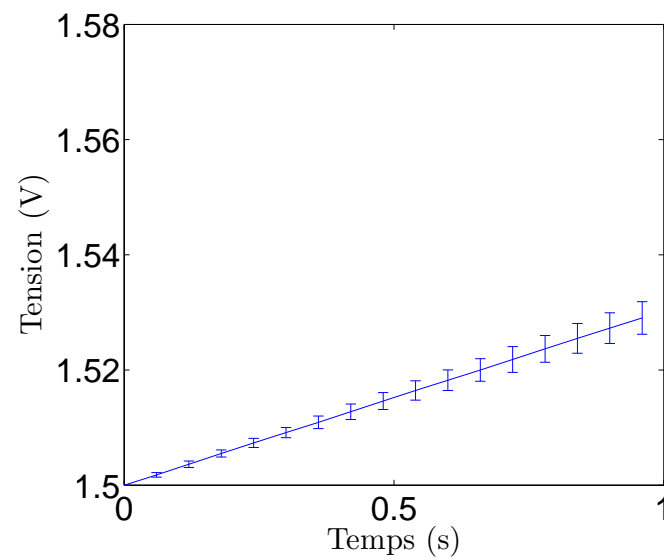


Figure 4.15 Répartition de la tension des supercondensateurs pour une charge à courant alternatif avec une source de tension alternative.

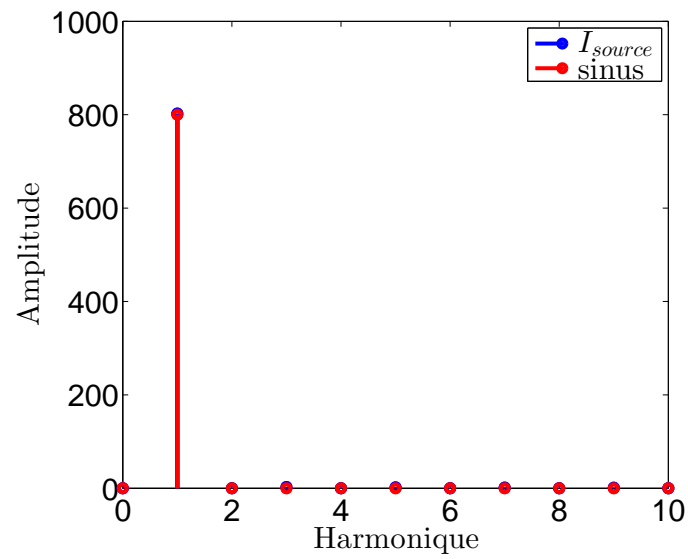


Figure 4.16 TDF du courant alternatif dans la branche des supercondensateurs pendant une opération de recharge avec une source de tension alternative.

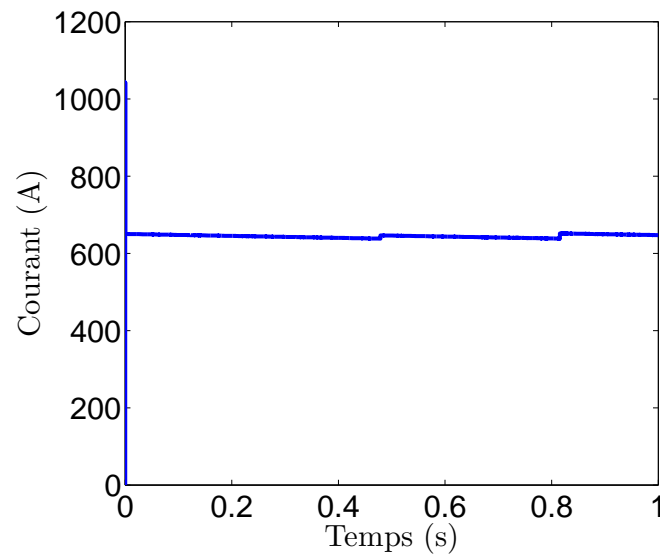


Figure 4.17 Courant lors de la charge des supercondensateurs de 3400 F avec une source de tension continue.

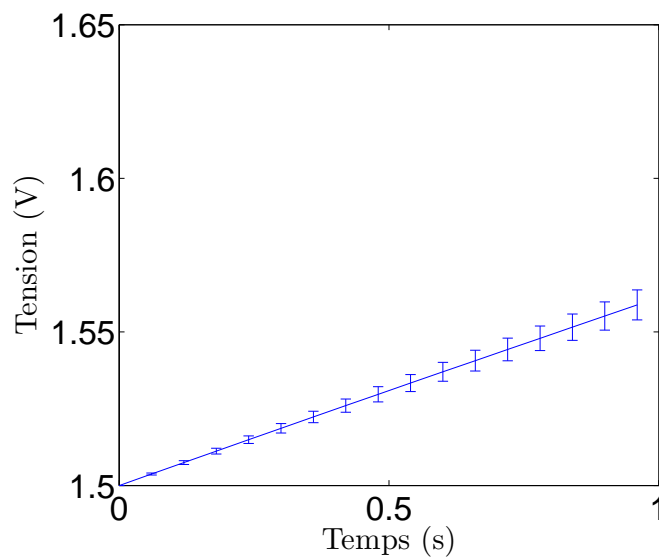


Figure 4.18 Répartition de la tension des supercondensateurs de 3400 F pendant une opération de recharge avec une source de tension continue.

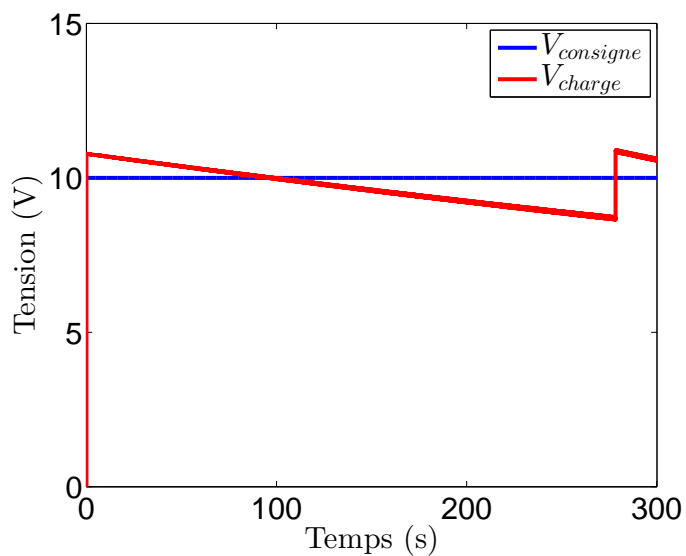


Figure 4.19 Alimentation d'une charge en tension continue avec l'algorithme de mouvement circulaire pour des supercondensateurs de 350 F.

Tableau 4.4 Valeurs des paramètres lors d’une recharge à partir d’une source CA avec un courant CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	200	-
V initial	1.5	V
V_s	200	V
R	0	Ω
L	0.1	μH
$I_{consigne}$	800 ± 11	A
f	60	Hz

Tableau 4.5 Valeurs des paramètres lors d’une recharge à partir d’une source CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	200	-
V initial	1.5	V
V_s	200	V
R	0	Ω
L	0.1	μH
$I_{consigne}$	500 ± 11	A

Tableau 4.6 Valeurs des paramètres lors de l’alimentation d’une charge en CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V initial	2.7	V
V_s	0	V
R	2	Ω
L	0	H
$V_{consigne}$	10 ± 1.35	V

au cours de la simulation.

4.4.2 Alimentation d’une charge en alternatif : 15 V_{PEAK} à 1 Hz

Le tableau 4.7 résume les paramètres de simulation.

La tension de consigne $V_{consigne}$ et la tension de la branche de supercondensateurs V_b sont représentées à la Figure 4.21. La tension de la branche a la forme d’un sinus discrétisé à 2.7 V et son amplitude est de 15 V. La tension de la branche V_b , respecte bien ± 1.35 V autour de la tension de consigne. La répartition de la tension des supercondensateurs au cours du temps lors de cette simulation est représentée sur la Figure 4.22. Le mouvement circulaire

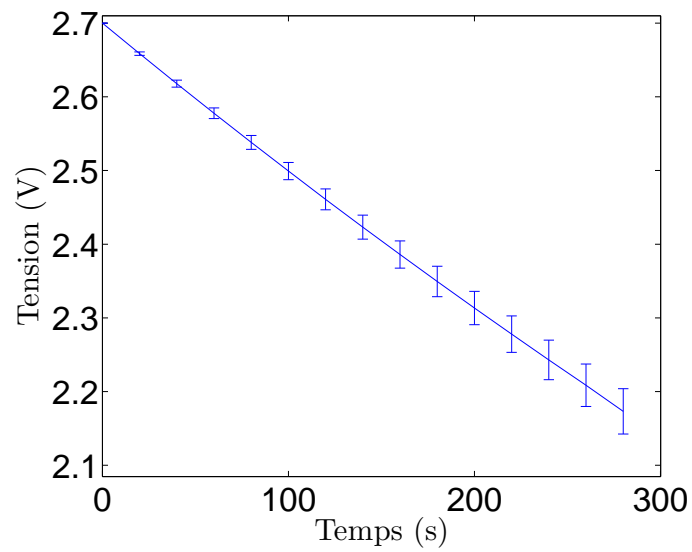


Figure 4.20 Répartition de la tension dans les supercondensateurs de 350 F lors de l'alimentation d'une charge à tension continue.

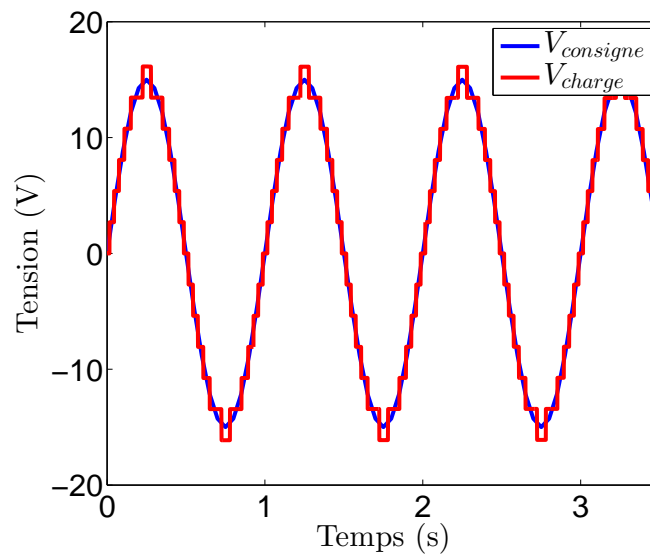


Figure 4.21 Alimentation d'une charge en tension alternative avec l'algorithme de mouvement circulaire pour des supercondensateurs de 350 F.

Tableau 4.7 Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V initial	2.7	V
V_s	0	V
R	2	Ω
L	0	H
$V_{consigne}$	15 ± 1.35	V
f	1	Hz

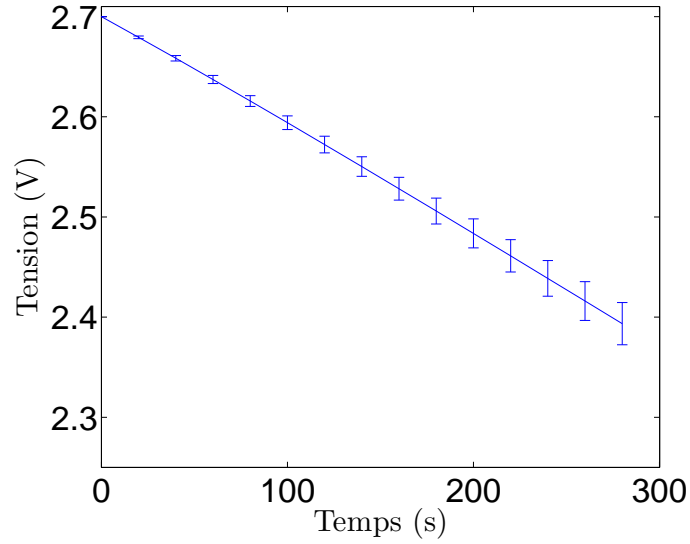


Figure 4.22 Répartition de la tension dans les supercondensateurs.

du premier supercondensateur mis en conduction permet à tous les supercondensateurs de se décharger.

Une Transformée Discrète de Fourier a été faite afin de vérifier les harmoniques du sinus discrétisé. Sur la Figure 4.23 est représenté la TDF de la tension de la branche ainsi que celle de la consigne redressée, afin de comparer les harmoniques. Les courbes sont confondues, malgré quelques différences.

4.5 Algorithmes lors de la charge des supercondensateurs de 350 F

Dans cette section, les courbes présentées sont réalisés avec 14 supercondensateurs de 350 F, d'*ESR* 3.2 m Ω . Les résistances R_s et R_c sont respectivement de 2.4 m Ω et 4.1 m Ω . Le pas de temps de la simulation est de 1 ms. L'inductance connectée en série à la branche vaut

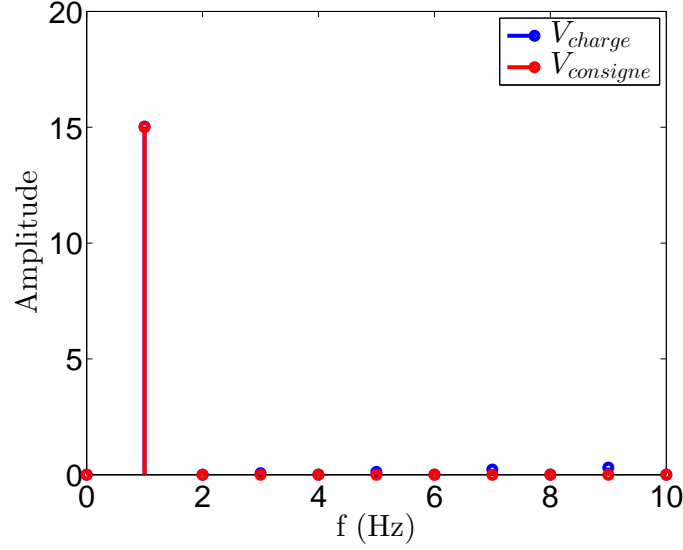


Figure 4.23 Transformée discrete de Fourier de la tension à la charge et d'un signal sinusal.

0.1 mH et la charge 1 Ω .

4.5.1 Charge avec source de tension CA 15 V_{PEAK} à 0.1 Hz, courant CA

Le tableau 4.8 résume les paramètres de simulation.

La Figure 4.24 présente le courant I_b qui circule dans la branche de supercondensateurs. Pour cette simulation, il est de forme sinusoïdale, compris entre un minimum et un maximum.

La Figure 4.25 présente la répartition de la tension des supercondensateurs au cours de la simulation. Une TDF est réalisée afin de vérifier la forme sinusoïdale du courant.

La Figure 4.26 présente la TDF du courant, ainsi que la TDF d'une sinusoïde redressée.

4.5.2 Charge avec source de tension CA 15 V_{PEAK} à 0.1 Hz, courant CC

La Figure 4.27 présente le courant I_b qui circule dans la branche de supercondensateurs. Pour cette simulation, le courant circulant dans les supercondensateur est constant.

La Figure 4.28 présenté la répartition de la tension des supercondensateurs au cours de la simulation.

4.5.3 Charge avec une source de tensions CC de 10V

Le tableau 4.9 résume les paramètres de simulation.

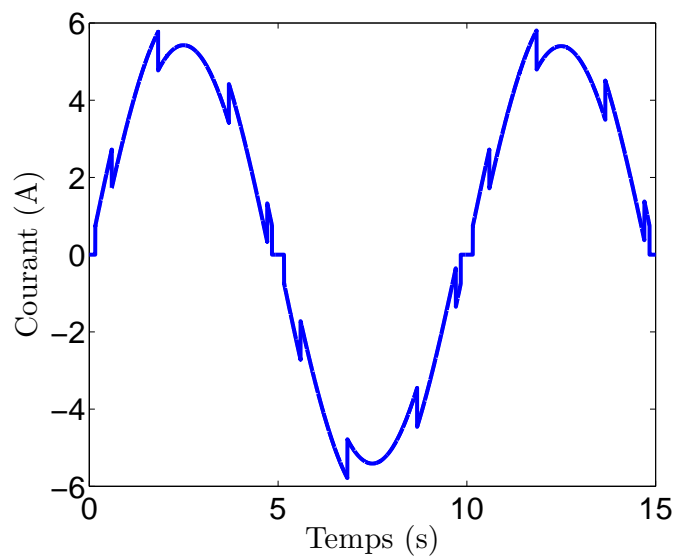


Figure 4.24 Courant dans la branche durant la charge avec l'algorithme de mouvement circulaire pour des supercondensateurs de 350 F avec une source de tension CA.

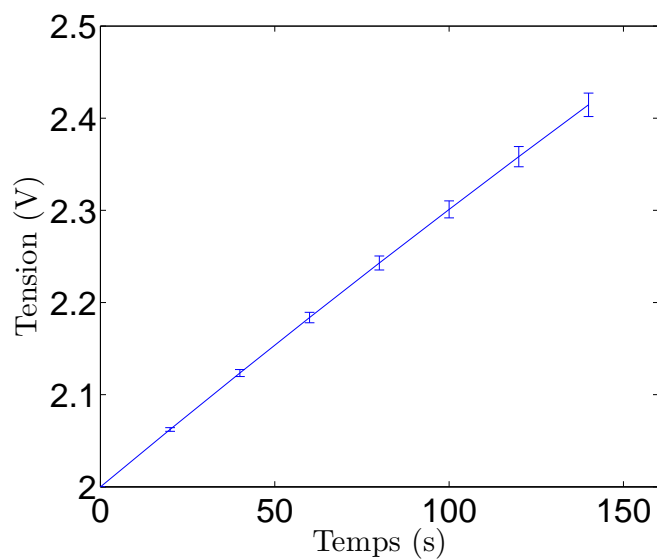


Figure 4.25 Répartition de la tension dans les supercondensateurs de 350 F en mode recharge avec une source de tension CA.

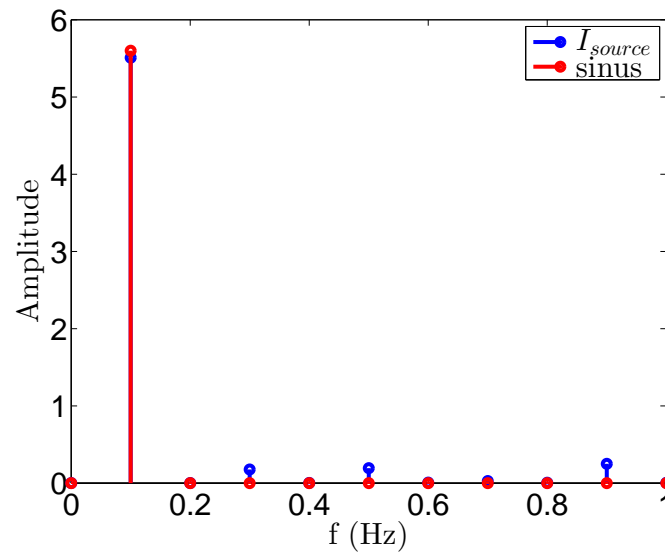


Figure 4.26 Transformée discrete de Fourier du courant et d'un signal sinusoïdal pour des supercondensateurs de 350 F avec une source de tension CA.

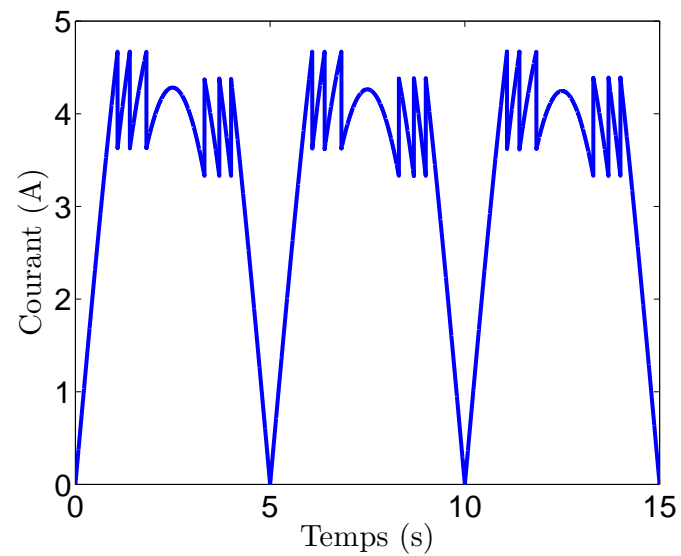


Figure 4.27 Courant dans la branche durant la charge avec l'algorithme de mouvement circulaire pour des supercondensateurs de 350 F avec une source de tension CA.

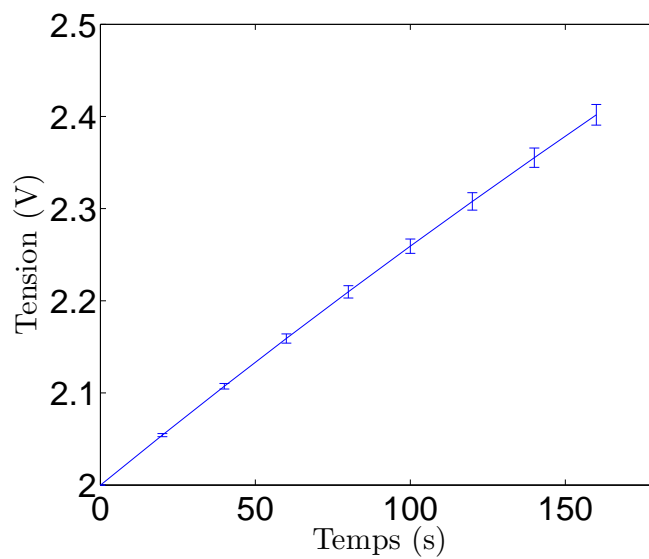


Figure 4.28 Répartition de la tension dans les supercondensateurs de 350 F avec une source de tension CA.

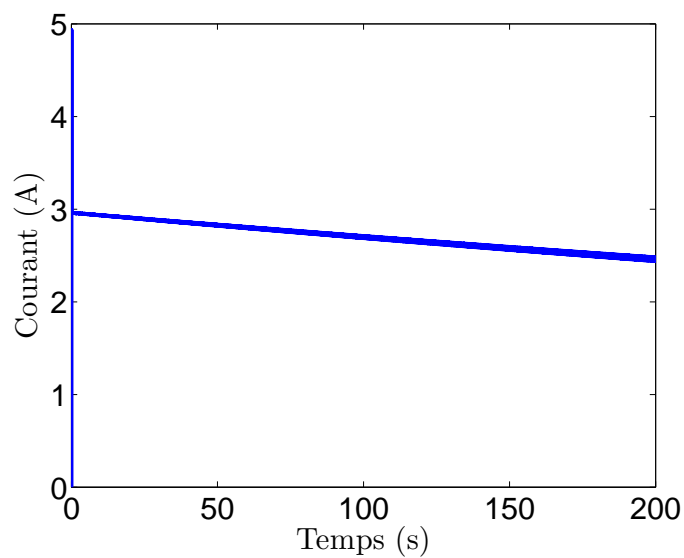


Figure 4.29 Courant dans la branche durant la charge avec l'algorithme de mouvement circulaire pour des supercondensateurs de 350 F et une source de tension CC.

Tableau 4.8 Valeurs des paramètres lors de la recharge à partir d'une source CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V initial	2	V
V_s	15	V
f	0.1	Hz
R	2	Ω
L	0	H
$I_{consigne}$	3 ± 1	A

Tableau 4.9 Valeurs des paramètres lors de la recharge à partir d'une source CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V initial	2	V
V_s	10	V
R	2	Ω
L	0	H
$I_{consigne}$	3 ± 1	A

La Figure 4.29 présente le courant circulant dans la branche de supercondensateur I_b . La répartition des tension des supercondensateurs durant cette simulation est représentée à la Figure 4.30.

4.6 Analyse fréquentielle des signaux créés par la branche de supercondensateurs

Soit $x(t) = A \sin(\omega_0 t)$ et $f(t)$ la fonction $x(t)$ discrétisée par paliers de V_i , la tension d'un supercondensateur. Les signaux sont détaillés à la Figure 4.31. Les temps t_k sont les moments où il y a un changement de palier. Le changement de palier se fait pour le temps t_k tel que $A \sin(\omega_0 t_k) = (k - 1) \frac{V_c}{2}$.

La fonction $f(t)$ peut être écrite sous la forme d'une série de Fourier car elle est périodique :

$$f(t) = a_0 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t). \quad (4.1)$$

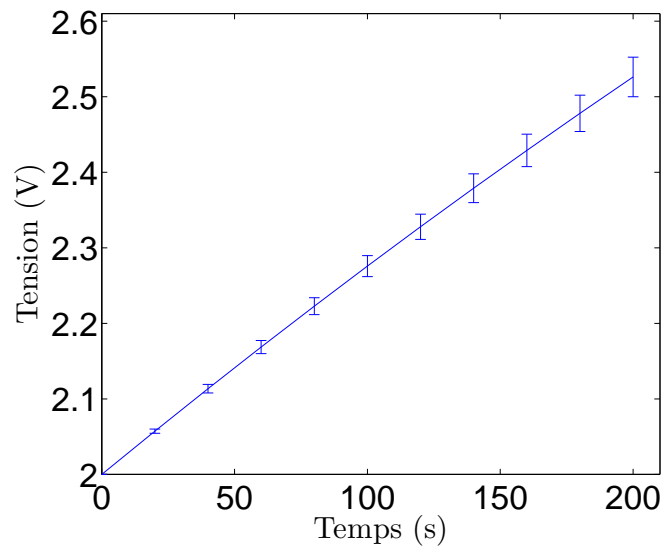


Figure 4.30 Répartition de la tension dans les supercondensateurs de 350 F et une source de tension CC.

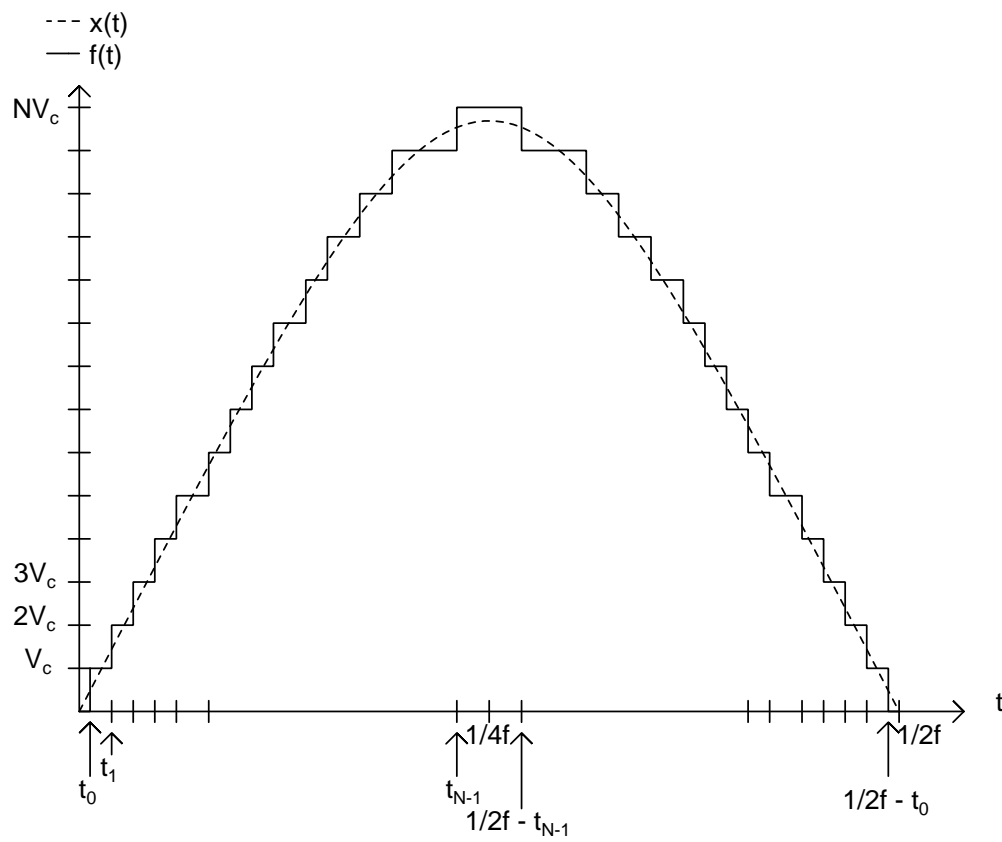


Figure 4.31 Illustration des courbes $x(t)$ et $f(t)$, ainsi que des temps t_k sur une demi-période.

La fonction $f(t)$ est impaire car $f(-t) = -f(t)$. Les coefficients a_0 et a_n sont donc nuls. La fonction $f(t)$, s'écrit alors simplement :

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \\ \text{avec } b_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin(nx) dx. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Sa transformée de Fourier peut donc être écrite sous la forme :

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \sum_{n=1}^{\infty} b_n \delta(\omega - n\omega_0), \\ \text{avec } b_n &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{N-1} kV_c \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sin(n\omega_0 t) dt \\ &\quad + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{N-1} kV_c \int_{\frac{1}{2f}^{-t_k}}^{\frac{1}{2f}^{-t_{k-1}}} \sin(n\omega_0 t) dt \\ &\quad + \frac{2}{\pi} NV_c \int_{t_{N-1}}^{\frac{1}{2f}^{-t_{N-1}}} \sin(n\omega_0 t) dt. \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{De plus } \int \sin(nx) dx &= \cos(x), \\ \text{et } \cos(n\pi - a) &= -\cos(a), \text{ si } n \text{ impair,} \\ &= \cos(a), \text{ si } n \text{ est pair.} \end{aligned} \quad (4.4)$$

L'intégrale de l'équation (4.4), peut donc être simplifiée avec les équation (4.5) comme suit :

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{N-1} kV_c \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sin(n\omega_0 t) dt + \frac{2}{\pi} NV_c \int_{t_{N-1}}^{\frac{1}{2f}^{-t_{N-1}}} \sin(n\omega_0 t) dt, \text{ si } n \text{ est impair} \\ b_n &= 0, \text{ si } n \text{ est pair.} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ceci donne, après intégrale de l'équation (4.6) :

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^{N-1} kV_c (\cos(n\omega_0 t_{k-1}) - \cos(n\omega_0 t_k)) - NV_c \cos(n\omega_0 t_{N-1}) \right] \quad (4.6)$$

$$\text{avec } \omega_0 t_{k-1} = \arcsin \left(\frac{(2k-1)V_c}{2A} \right) \quad (4.7)$$

$$\text{et } N = \lfloor \frac{A}{V_c} \rfloor \quad (4.8)$$

$$A \sin(\omega_0 t_k) = (k-1) \frac{V_c}{2} \quad (4.9)$$

4.7 Vitesse de mouvement circulaire

La vitesse de mouvement circulaire, quantifié par la fréquence à laquelle le premier supercondensateur mis en conduction a est incrémenté, influence la différence de tension entre les supercondensateurs. La Figure 4.32 présente la charge de $N = 5$ supercondensateurs à courant constant I_b . Il y a $n = 2$ supercondensateurs mis en conduction. La figure n'est pas à l'échelle par soucis de visibilité. Sur l'axe des abscisses, chaque intervalle correspond à un incrément de la position a du premier supercondensateur mis en conduction à chaque temps δt . Sur l'axe des ordonnées, chaque intervalle correspond à la charge du supercondensateur δV durant un temps δt . Comme le courant I_b est constant, il est possible de calculer la charge d'un supercondensateur $\delta V = \frac{I_b \delta t}{C}$. L'écart maximum dans les supercondensateurs est la différence entre la tension du supercondensateur le plus chargé et le moins chargé. Cet écart est proportionnel au nombre de supercondensateurs mis en conduction n , soit 2 sur la Figure 4.32.

La Figure 4.33 présente la différence de tension pour $n = 100$ supercondensateurs de 3400 F mis en conduction, pour des courants I_b de branche de 0 à 100 A et des fréquences d'incrément de a de 0 à 500 Hz.

Les algorithmes définis dans les sections précédentes permettent à tous les supercondensateurs de se décharger au cours de la simulation, et à la tension de la branche V_b de respecter la consigne $V_{consigne}$. Cependant, dû aux différences des capacités, les supercondensateurs ayant la plus faible capacités seront déchargés avant. De même, les supercondensateurs ayant la plus grande capacité se déchargeront plus lentement. Sur la Figure 4.34 sont représentés plusieurs cycles de charge et de décharge de 6 supercondensateurs de capacités différentes : 3400 F, 2720 F (-20%) et 4080 F (+20%). Les différences de tensions à l'instant initial ont été calculées afin que tous les supercondensateurs aient la même tension maximale et ainsi avoir une énergie maximale : $V_{max}^i - V_{min}^i = \frac{I_b t}{C_i}$. Comme le condensateur ayant la plus petite

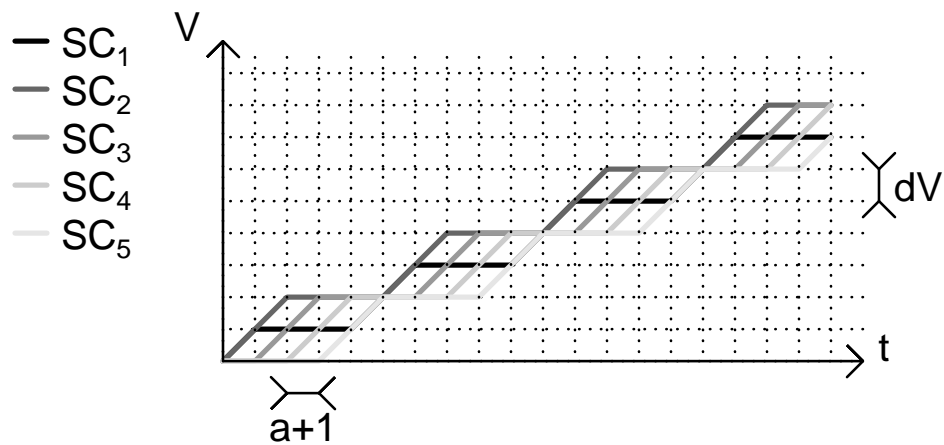


Figure 4.32 Agrandissement de la tension de 5 supercondensateurs durant une charge à courant constant en fonction du temps.

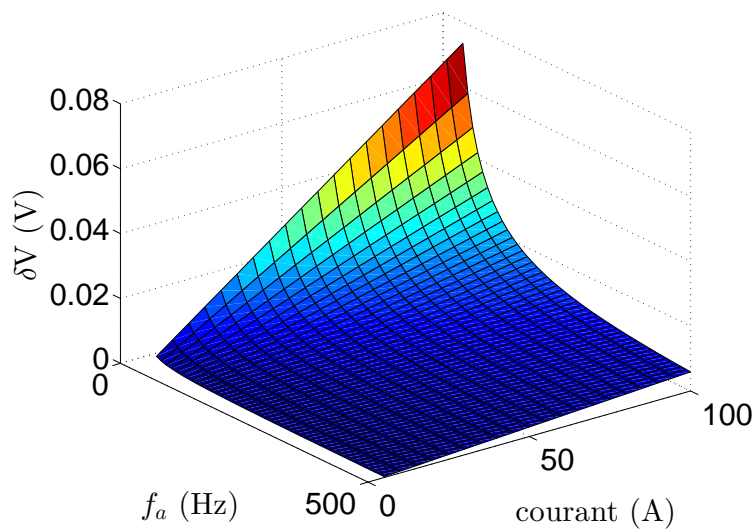


Figure 4.33 Écart de tension entre les supercondensateurs de 3400 F en fonction du courant et de la vitesse du mouvement circulaire en Hz.

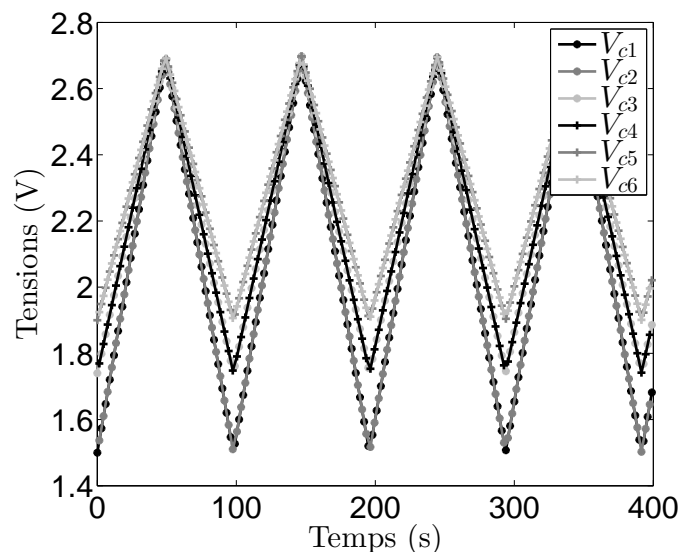


Figure 4.34 Tensions de supercondensateurs ayant $\pm 20\%$ de différence pour plusieurs cycle de charge et décharge à courant constant.

capacité sera chargée en premier, c'est la capacité la plus faible qui détermine le temps t de charge ou de décharge : $t = \frac{2720(V_{max} - V_{min})}{I_b}$. L'écart des tensions des supercondensateurs après les décharges correspond à l'état initial, et les tensions des supercondensateurs après la charge sont identiques.

4.8 Résumé

Grâce à la modélisation du chapitre précédent, des algorithmes ont pu être testés sur des scripts Matlab. Différents algorithmes ont été testés, mais un seul a été gardé et est présenté dans ce mémoire : l'algorithme par mouvement circulaire. Le mouvement circulaire de l'indice du premier supercondensateur mis en conduction dans la branche, permet de charger ou décharger tous les supercondensateurs présents dans la branche. Des simulations de charge des supercondensateurs à partir d'une source de tension alternative ou continue ont été réalisées pour des cellules comprenant des supercondensateurs de 3400 F et 350 F. La commande peut être à courant constant ou à courant alternatif pour une source de tension alternative. Ces commandes ont un intérêt différent : à courant continu, les supercondensateurs se rechargent plus vite, mais certaines sources de tensions nécessitent une commande à courant alternatif redressé, notamment le réseau électrique, afin de ne pas y induire d'harmoniques qui endommageraient les composants tel que les transformateurs. Si le courant circulant dans la branche I_b est sous la forme d'un sinus redressé, la source de tension le perçoit comme un

sinus grâce à l'inverseur de polarité constitué par le pont en H quatre quadrants. Lors de la décharge, des simulations à tension alternative ou continue ont été réalisées pour des cellules comprenant des supercondensateurs de 3400 F et 350 F.

CHAPITRE 5 MESURES DES PERFORMANCES DU SYSTÈME RÉEL

5.1 Introduction

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur un système composé de 6 supercondensateurs. La commande des cellules se fait sur Hypersim, un système qui contrôle en temps réel des entrées/sorties analogiques et numériques. Les entrées et sorties d'Hypersim sont illustrées à la Figure 5.1. Les algorithmes de commande ont été réalisés sur Simulink, puis compilés pour être intégrés à Hypersim. Les cellules présentes au laboratoire ne peuvent être commandées plus rapidement qu'une milliseconde dû à leur conception hardware. Le pas de temps de la simulation sur Hypersim est donc d'une milliseconde.

5.2 Montage électrique

5.2.1 Entrées/Sorties Hypersim

Les sorties numériques du module d'entrées/sorties d'Hypersim sont des sorties à collecteur ouvert. Cela veut dire qu'une résistance de tirage doit être ajoutée afin que le signal de sortie soit de 0 V ou de 5 V, tel qu'illustré à la Figure 5.2. La résistance est mise en conduction entre la masse et l'émetteur. Le signal numérique est aux bornes de cette résistance. Lorsque le transistor est bloqué, le signal numérique vaut 0 V. Lorsque transistor est passant, le courant qui circule dans la résistance crée une tension de 5 V.

Afin d'être commandées, les cellules disposent de quatre entrées numériques. Les signaux sont découplés grâce à un optocoupleur. Pour mettre en conduction ou contourner un supercondensateur, il faut envoyer un état haut pour mettre le supercondensateur en conduction, ou le contourner. Le module d'entrées/sorties d'Hypersim ne comporte que 16 sorties nu-



Figure 5.1 Entrées et sorties analogiques et numériques d'Hypersim.

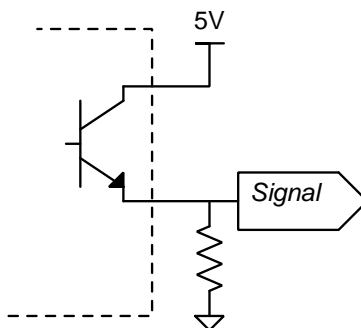


Figure 5.2 À gauche des pointillés : une sortie numérique à collecteur ouvert ; à droite : la résistance de tirage entre l'émetteur et la masse, et le collecteur connecté à l'alimentation positive.

mériques, par conséquent, le nombre de cellules pouvant être commandées est limité. Un démultiplexeur est utilisé afin de réduire le nombre de sorties numériques requises au niveau du module d'entrées/sorties d'Hypersim pour mettre en conduction ou contourner les supercondensateurs.

5.2.2 Démultiplexeur

Le démultiplexeur est un circuit logique qui reçoit $N + 1$ signaux en entrée et possède 2^N signaux de sortie. Le démultiplexeur SN74154 est utilisé pour contrôler les cellules. Ce démultiplexeur reçoit 5 signaux en entrée et possède 16 signaux de sortie. La logique combinatoire est montrée au tableau 5.1, avec L pour désigner l'état bas (Low), soit 0 V, et H pour désigner l'état haut (High), soit 5 V. Dans la logique combinatoire du démultiplexeur, une seule sortie est à l'état bas pour chaque état de A, B, C et D. Par soucis de simplicité, il a été choisi d'ajouter des inverseurs en sortie du démultiplexeur, afin qu'une seule sortie soit à l'état haut. Pour qu'aucune sortie ne soit activée, G doit être à l'état haut. Le circuit avec les résistances de tirage, le démultiplexeur et les inverseurs est illustré à la Figure 5.3. Dans le circuit complet, il y a deux démultiplexeurs : un pour commander l'activation des supercondensateurs, et un autre pour commander leur contournement. Seules les sorties 1 à 14 sont utilisées. En effet, la sortie 0 pose un problème car à chaque pas de temps, Hypersim envoie de nouveaux signaux aux démultiplexeurs. Pendant un cours instant, toutes les entrées du démultiplexeur sont à 0 V, et la sortie 0 est à l'état haut, ce qui a pour effet de connecter accidentellement le premier supercondensateur de la branche. Pour cette raison, la sortie 0 n'est pas utilisée.

Tableau 5.1 Logique combinatoire du démultiplexeur SN74154.

Inputs					Outputs															
G	D	C	B	A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H
L	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H
L	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H
L	H	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H
L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
L	H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H
L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H
L	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H

5.2.3 Inverseur de polarité avec pont en H

Afin de pouvoir recharger les supercondensateurs avec une tension négative, ou d'alimenter une charge avec une tension négative, un pont en H a été implémenté. Le circuit du pont en H est illustré à la Figure 5.4.

En supposant que la tension $V^+ - V^-$ est positive :

- $V_s^+ - V_s^- \geq 0$ avec Q_1 et Q_3 passants et Q_2 et Q_4 bloqués,
- $V_s^+ - V_s^- \leq 0$ avec Q_2 et Q_4 passants et Q_1 et Q_3 bloqués.

5.2.4 Contrôleur de grille des MOSFETs

Pour mettre les MOSFETs en conduction, la tension entre la grille et la source des MOSFETs de type N doit être positive. La tension $V_s^+ - V_s^- = V_s$ pouvant être supérieure à 16 V, par exemple, avec 6 supercondensateurs en série tel que dans ce montage, la tension de source des MOSFETs Q_1 et Q_4 peut l'être aussi. Il faut donc que la tension de la grille soit supérieure à la tension de la source. Pour cela, un MOSFET *driver* est utilisé : NCP5304. Il commande la grille avec la tension de la source plus 5 V. Le NCP5304 permet de contrôler les MOSFETs par paire Q_1 et Q_2 , et Q_3 et Q_4 . Le circuit est illustré Figure 5.5. Le MOSFET *driver* reçoit

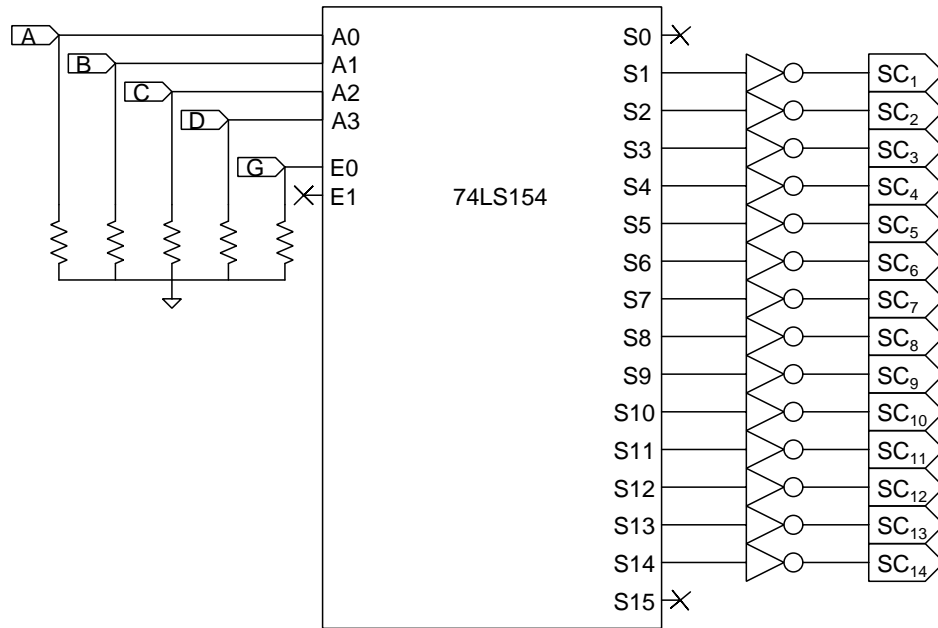


Figure 5.3 Schéma du démultiplexeur comprenant les résistances de tirages en entrée et les inverseurs en sortie.

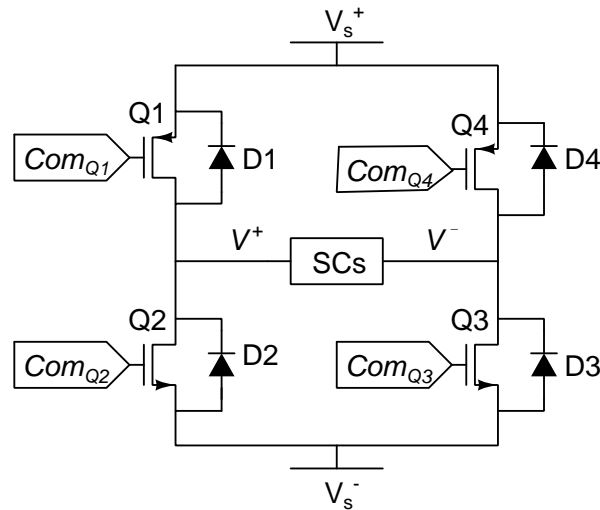


Figure 5.4 Schéma d'un pont en H constitué de 4 MOSFETs et 4 diodes.

en entrée deux signaux numériques, In_1 et In_2 . Le NCP5304 est équipé en interne d'une protection qui empêche de mettre en conduction les deux MOSFETs simultanément si les deux signaux d'entrée se recouvrent. Les signaux In_1 et In_2 commandent respectivement les MOSFETs Q_1 et Q_2 . Comme les transistors Q_1 et Q_3 doivent conduire en même temps, les signaux sur le deuxième MOSFET driver commandent respectivement Q_3 et Q_4 .

- Le condensateur C_{boot} fournit l'énergie nécessaire pour mettre en conduction le transistor Q_1 ou Q_4 . Il doit pouvoir fournir l'énergie suffisante pour commander la grille du transistor, sans se décharger plus de 10%. Afin de respecter cela, il est recommandé que C_{boot} soit 10 fois plus grand que la capacité équivalente de la grille du transistor C_g . De plus, le condensateur de découplage doit être 10 fois plus grand que C_{boot} , pour que C_{boot} puisse se charger sans induire une chute de tension d'alimentation.
- La diode D_{boot} est une diode à récupération rapide et doit avoir une faible tension de seuil et une faible capacité.
- Le choix de R_{boot} se fait en fonction du courant peak qui circule dans la diode D_{boot} :

$$I_{Dboot(peak)} = \frac{5V - V_{Dboot}}{R_{boot}}.$$

Une résistance R est en série entre le MOSFET *driver* et la grille du MOSFET. Elles permettent de limiter les oscillations dues aux inductances et capacités parasites, et aussi de limiter le courant à la grille du MOSFET : $I_g = 5/R$.

5.3 Architecture de la commande sur Hypersim et Matlab

Les cellules testées au laboratoire possèdent une sécurité hardware qui contourne les supercondensateurs si leur tension dépasse 2.7 V, ou si elle est plus faible que 2 V. Cela signifie qu'il n'est pas possible de commander les supercondensateurs en dehors de cette plage de tension. Il est donc nécessaire de les charger jusqu'à 2 V avec une source de courant constant. Aussi,

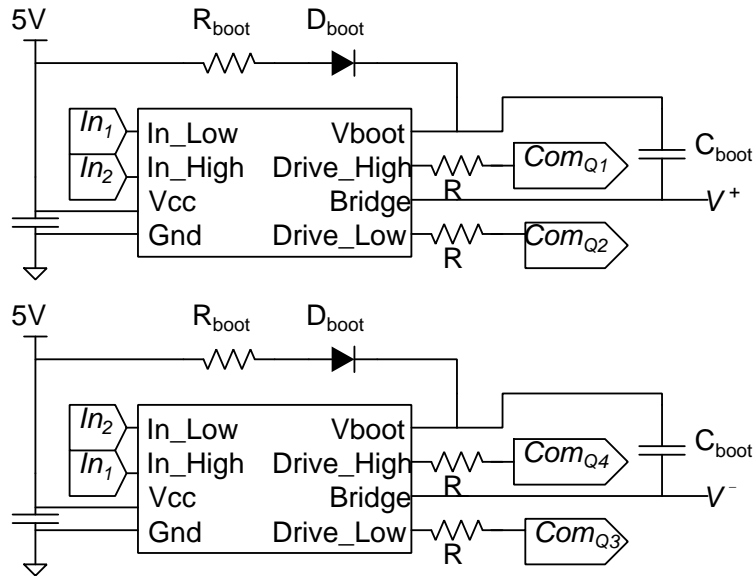


Figure 5.5 Schéma des drivers de MOSFETs du pont en H ainsi que des composants électroniques nécessaires à leur utilisation.

il n'est pas nécessaire de mesurer leur tension pour les mettre en blocage. Les mesures analogiques des tensions des supercondensateurs sont faites uniquement dans le but de vérifier l'efficacité des algorithmes. L'algorithme utilise seulement la mesure de la tension V_b de la branche et la mesure du courant I_b circulant dans la branche afin de définir sa commande.

Parce que la commande des cellules est implémentée dans l'environnement Simulink, mais compilée afin d'en faire un système embarqué, toutes les variables internes et de sorties doivent être initialisées. Il est donc impossible de garder en mémoire des valeurs de variables. La commande de ces cellules est de l'ordre de la milliseconde, dû à la construction hardware. Pour contrôler les supercondensateurs, le système embarqué sous Simulink se décompose en deux parties : une partie *Commande*, qui prend les décisions quant au nombre de supercondensateurs mis en conduction et à l'incrément de l'indice du premier supercondensateur mis en conduction, et une partie *Traitement*, qui génère les signaux pour commander les supercondensateurs. L'algorithme du système embarqué dans son ensemble est illustré à la Figure 5.6.

5.3.1 Commande de la décharge des supercondensateurs

Le pas de temps de la simulation est plus rapide que le pas de temps de l'algorithme. Un compteur, $compt_1$, a été implémenté pour retarder les décisions de l'algorithme, car il y a deux pas de temps de décalage avec les acquisitions analogiques. Lorsque le compteur passe à 0, l'algorithme prend une décision sur le contrôle du nombre de supercondensateurs mis en conduction, n . Ce nombre est compris entre 0 et N , soit le nombre total de supercondensateurs présents dans la branche. Un autre compteur, $compt_2$, permet de décaler l'indice du premier supercondensateur mis en conduction, a , chaque fois que le compteur passe à 0. Ce nombre est compris entre 1 et N . Les signaux sont tels qu'illustrés à la Figure 5.7.

L'algorithme de la commande est présenté à la Figure 5.8. Il s'assure que la différence de tension entre la branche et la consigne est plus faible que la moitié de la tension maximale d'un supercondensateur : $V_{consigne} - V_b \leq 2.7/2$. Idéalement, il faut que cette différence de tension soit la moitié de la tension actuelle des supercondensateurs. La Figure 5.9 illustre la différence entre les deux niveaux de tensions. La fonction *borne* permet de borner les variables n et a , afin qu'elles ne dépassent pas leurs valeurs maximales.

Si la tension de la branche est trop faible, l'algorithme incrémente le nombre de supercondensateur mis en conduction. Si la tension de la branche est trop élevée, il décrémente ce nombre. Sinon, ce nombre est inchangé.

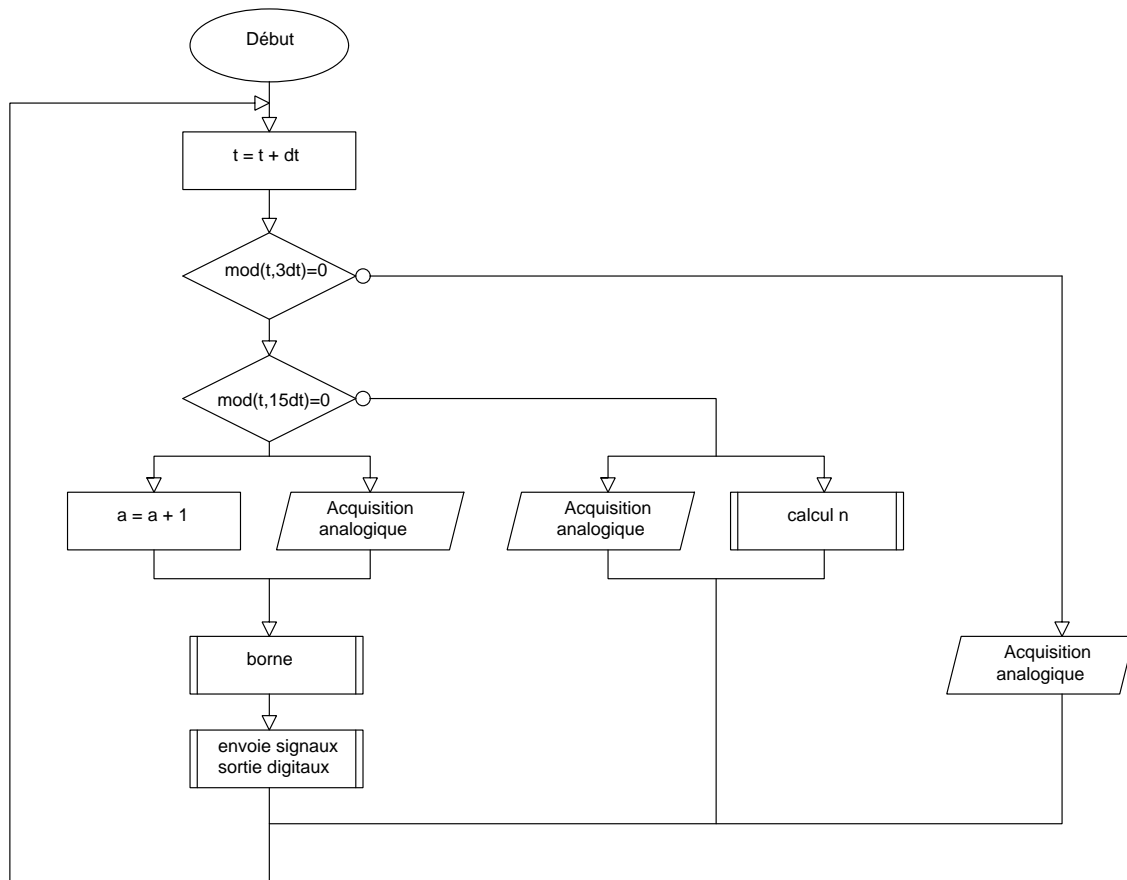


Figure 5.6 Algorithme du système embarqué sous Simulink.

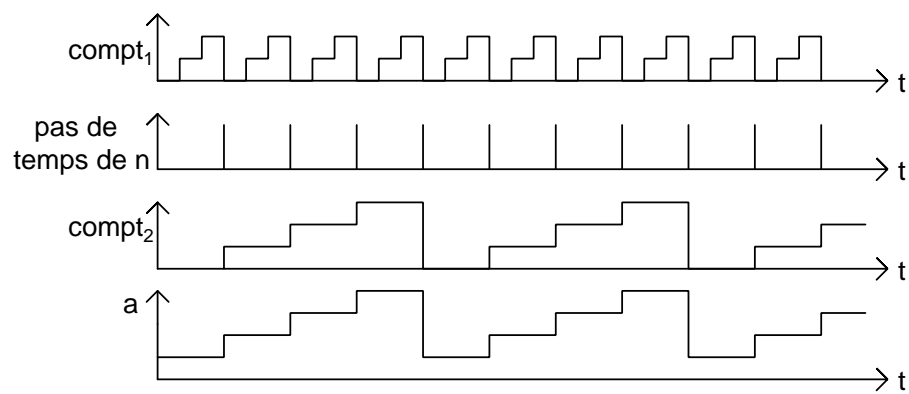


Figure 5.7 Signaux de commande générés sur Hypersim : $compt_1$, pas de temps de la commande, $compt_2$ et incrément de a .

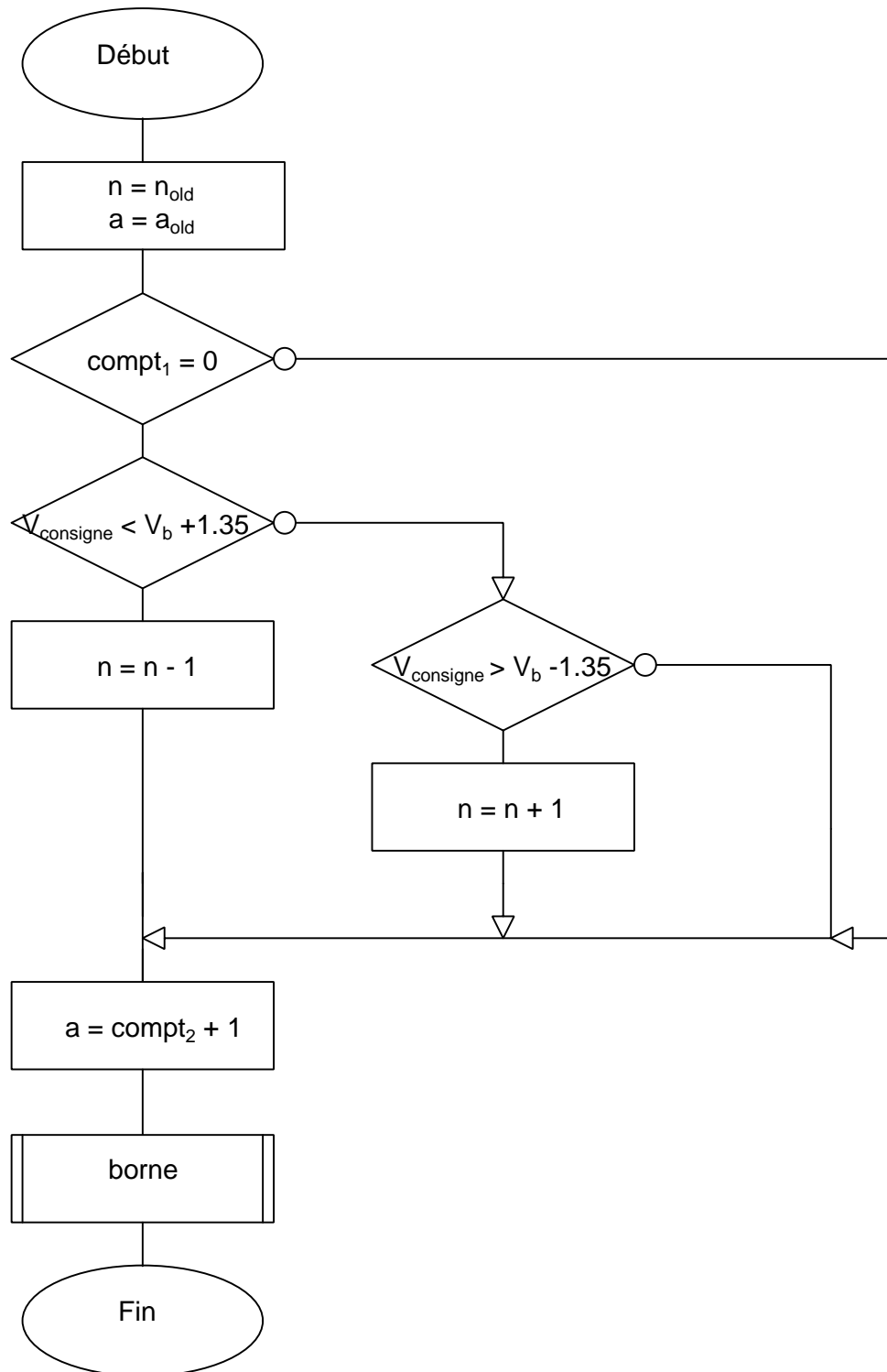


Figure 5.8 Algorithme de la commande des supercondensateurs lors de la décharge.

5.3.2 Commande de l'inverseur de polarité avec pont en H

Lors de la charge des supercondensateurs, les signaux d'entrée du MOSFET *driver* à la Figure 5.5, valent :

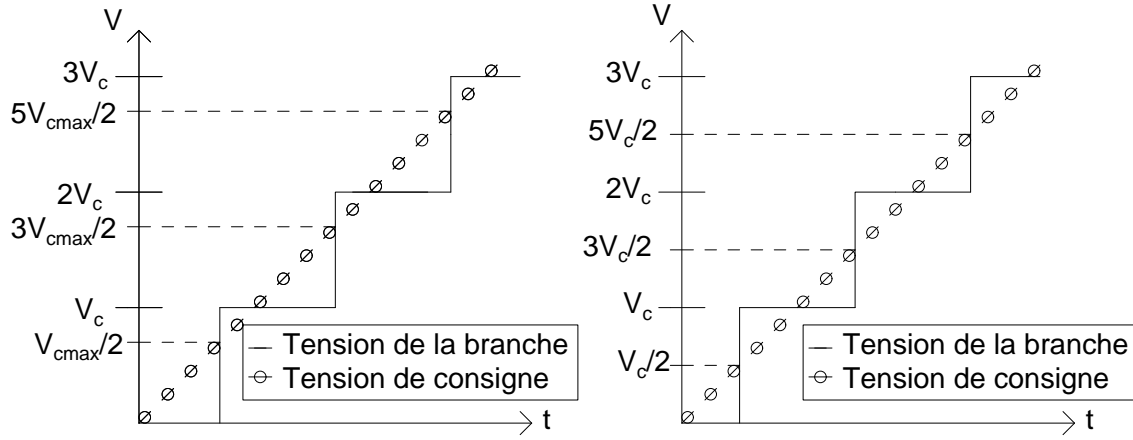


Figure 5.9 À gauche : commande avec $V_{consigne} - V_b \leq$ tension maximale des SCs/2, à droite : commande avec $V_{consigne} - V_b \leq$ tension actuelle des SCs/2

- Si $V_s^+ - V_s^-$ est positif, In_1 vaut 0 V et In_2 vaut 5 V,
- Si $V_s^+ - V_s^-$ est négatif, In_1 vaut 5 V et In_2 vaut 0 V.

Lors de la décharge des supercondensateurs, les signaux d'entrée du MOSFET *driver* à la Figure 5.5, valent :

- Si $V_{consigne}$ est positif, In_1 vaut 0 V et In_2 vaut 5 V,
- Si $V_{consigne}$ est négatif, In_1 vaut 5 V et In_2 vaut 0 V.

5.3.3 Commande de la charge des supercondensateurs

La recharge des supercondensateurs se fait à partir d'une source de tension, V_s . La tension de cette source est commandée par Hypersim en temps réel. Elle peut être continue ou sinusoïdale. Elle est aussi choisi de façon à ce que la différence de tension entre la branche de supercondensateurs et celle de la source ne crée pas un courant trop important. L'algorithme de la commande est schématisé à la Figure 5.10. Les courants I_{min} et I_{max} sont des bornes que le courant de branche I_b ne doit pas dépasser. Ces valeurs peuvent changer au cours du temps, comme dans le cas d'une charge à courant sinusoïdal.

5.3.4 Traitement des variables internes de l'algorithmes pour la commande des supercondensateurs

Le démultiplexeur n'est activé que si nécessaire. Il ne doit pas connecter un supercondensateur précédemment activé, ou contourner un supercondensateur précédemment contourné. Afin de réaliser cela, le programme compare les nouvelles valeurs du nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , et l'indice du premier supercondensateur, a , avec les valeurs au pas

de temps d'avant (n_{old} et a_{old}). Si elles sont différentes, les démultiplexeurs sont commandés. Lorsque la valeur de l'indice du premier supercondensateur mis en conduction change, le démultiplexeur doit contourner le supercondensateur dont l'indice est a , et mettre en conduction le supercondensateur $\text{mod}(a + n - 1, N) + 1$, avec a l'indice du premier supercondensateur mis en conduction, et n le nombre de supercondensateurs mis en conduction.

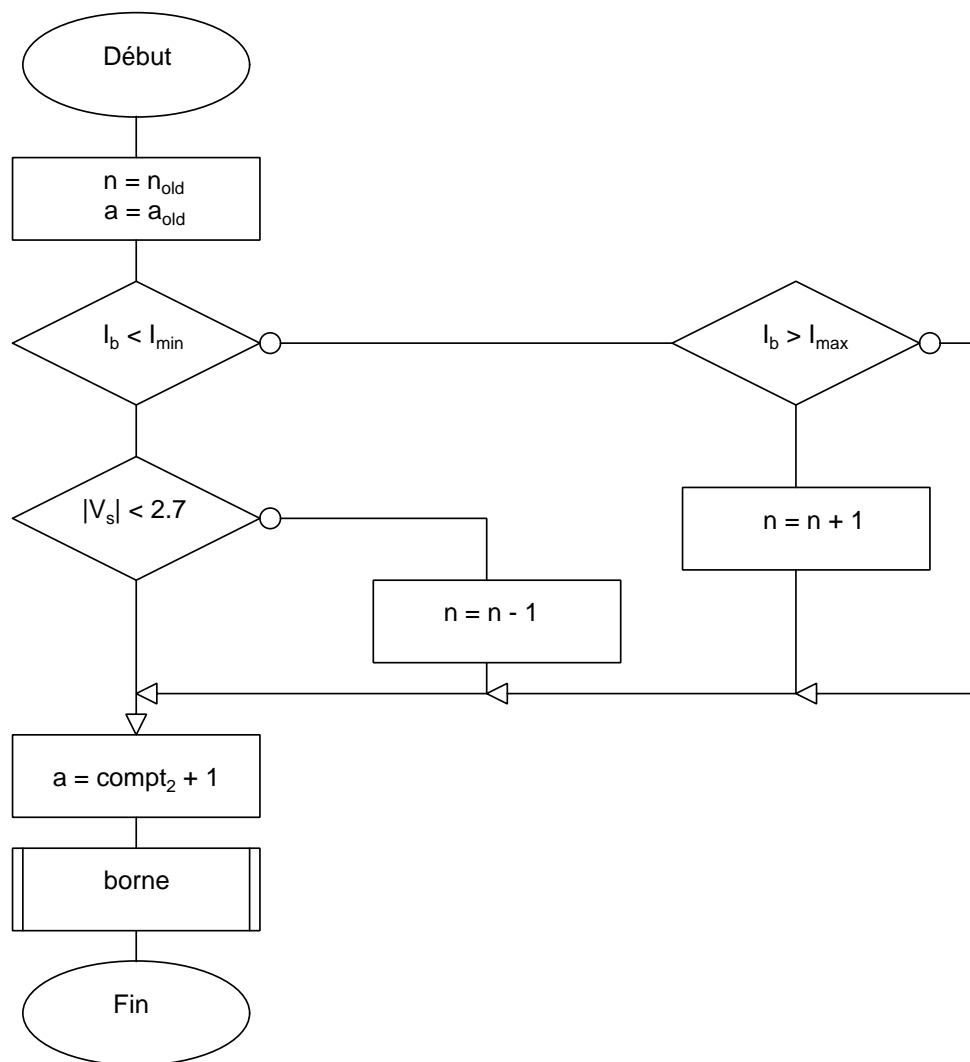


Figure 5.10 Algorithme de la commande des supercondensateurs lors de la charge.

Une fois le nombre a obtenu, les signaux envoyés au démultiplexeur sont :

$$\begin{aligned} A_r &= \lfloor \text{mod}(a, 2) \rfloor, \\ B_r &= \lfloor \text{mod}(a/2, 2) \rfloor, \\ C_r &= \lfloor \text{mod}(a/4, 2) \rfloor, \\ D_r &= \lfloor \text{mod}(a/8, 2) \rfloor, \\ G_r &= 0, \end{aligned}$$

avec $\lfloor x \rfloor$ la partie entière inférieure de x . Les signaux A_r , B_r , C_r et D_r sont les valeurs de a transformées en binaire.

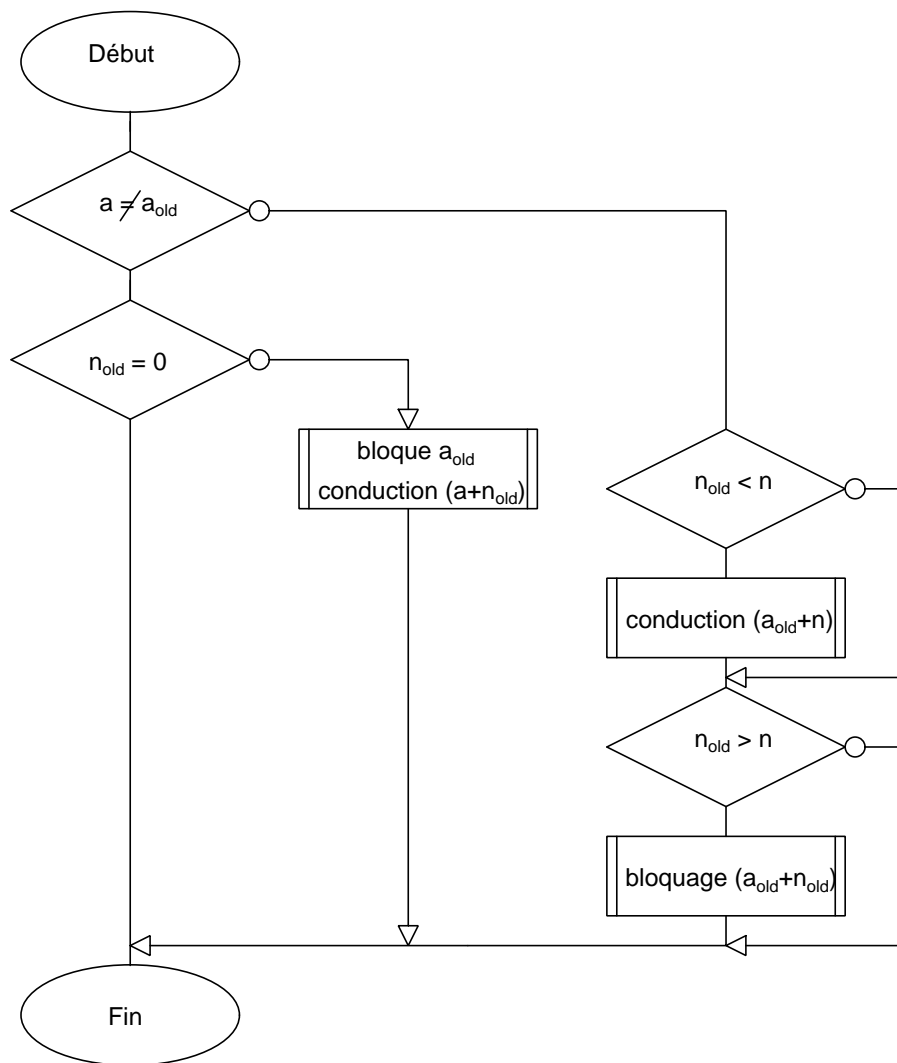


Figure 5.11 Algorithme du traitement des variables n et a .

Le démultiplexeur ne permet pas de mettre en conduction deux sorties simultanément. Par conséquent, l'algorithme ne peut pas incrémenter l'indice du premier supercondensateur mis en conduction et mettre en conduction un autre supercondensateur, car il faudrait mettre en conduction deux sorties du démultiplexeur simultanément. Il est cependant possible d'incrémenter l'indice du premier supercondensateur mis en conduction et décrémenter le nombre de supercondensateurs mis en conduction. Cela nécessite seulement de contourner le premier supercondensateur mis en conduction. Néanmoins, il a été choisi que le changement du nombre de supercondensateurs mis en conduction et la valeur de l'indice du premier supercondensateur mis en conduction ne puissent pas être modifiés au même pas de temps. Comme l'incrément de l'indice du premier supercondensateur mis en conduction se déroule moins souvent, c'est cette variable qui a la priorité : si l'algorithme utilise les démultiplexeurs pour mettre en conduction un supercondensateur et bloquer un supercondensateur, le nombre de supercondensateurs mis en conduction ne changera qu'au prochain pas de temps.

5.4 Résultats

5.4.1 Alimentation d'une charge en CC

Tension de consigne, tension de charge et variables de commande

Le tableau 5.2 résume les valeurs des composants.

La Figure 5.12, illustre la tension de consigne de 10 V, ainsi que la tension de la charge alimentée par la branche de supercondensateurs, en fonction du temps. La charge étant connectée directement à la branche de supercondensateurs, sa tension et celle de la branche sont identiques. Un agrandi a été réalisé et choisi sur cette plage de temps, afin d'illustrer l'incrément du nombre de supercondensateurs lorsque leur tension diminue. La tension aux bornes de la charge se situe à ± 1.35 V de la consigne.

Le nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , ainsi que la position du premier supercondensateur mis en conduction, a , sont illustrés sur la Figure 5.13, avec la tension de la branche. L'incrément du nombre de supercondensateurs mis en conduction n est visible.

Tensions des supercondensateurs en fonction du temps

Les tensions des supercondensateurs en fonction du temps sont représentées à la Figure 5.14. Les supercondensateurs se déchargent en même temps. Il est possible de voir les fluctuations des tensions des supercondensateurs en fonction du temps, car ils ne se déchargent à tout moment.

Tableau 5.2 Valeurs des paramètres lors de l'alimentation d'une charge en CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V_{initial}	2.7	V
V_s	0	V
R	2	Ω
V_{consigne}	10	V

5.4.2 Alimentation d'une charge en CA

Tension de consigne, tension aux bornes de la charge et variables de commande

Le tableau 5.3 résume les valeurs des composants.

La Figure 5.15, illustre l'évolution en fonction du temps de la tension de consigne sinusoïdale de 15 V à 1 Hz, et la tension aux bornes de la charge, alimentée par la branche de supercondensateurs. La tension de charge est un sinus discrétisé par paliers de 2.7 V et respecte la consigne.

Le nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , ainsi que la position du premier supercondensateur mis en conduction, a , sont montrés à la Figure 5.16, de même que la tension de charge.

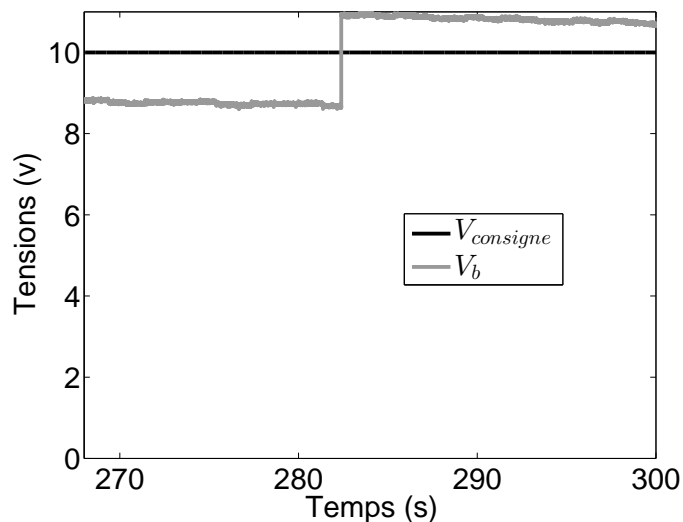


Figure 5.12 Tension de consigne et tension de la branche pour une décharge continue de 10 V en fonction du temps.

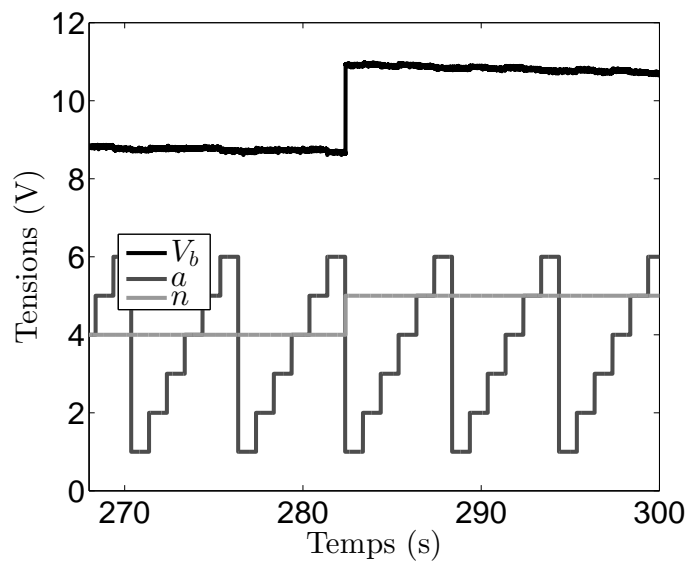


Figure 5.13 Tension de la branche, numéro a du premier supercondensateur mis en conduction, et nombre n de supercondensateurs mis en conduction, pour une décharge en tension continu, en fonction du temps.

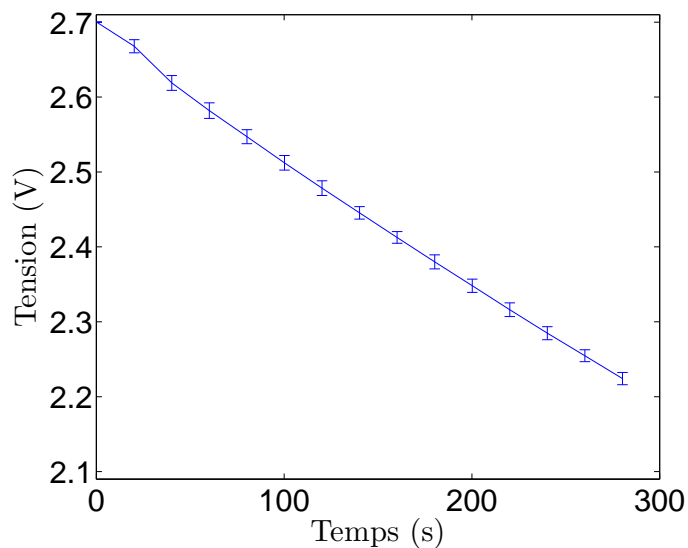


Figure 5.14 Tension aux bornes de chacun des supercondensateurs durant la décharge, pour une tension de consigne de 10 V, en fonction du temps.

Transformée Discrète de Fourier de la tension de la branche

Une Transformation de Fourier Rapide a été réalisée sur la tension de consigne et la tension de charge. La Figure 5.18 illustre la différence, en valeur absolue normalisée, de ces deux transformées. Même sur des signaux de faible tension, la différence entre les deux spectres

Tableau 5.3 Valeurs des paramètres lors de la charge en CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V_{initial}	2.7	V
V_s	0	V
R	2	Ω
V_{consigne}	15	V
f	1	Hz

est faible : 0.4 V de différence pour la fondamentale, soit 2.67%. Les autres fréquences sont dûes à la forme carrée du signal.

Tensions des supercondensateurs en fonction du temps

Les tensions des supercondensateurs en fonction du temps est représentée sur la Figure 5.17. Les supercondensateurs se déchargent en même temps. Il est possible de voir, avec les fluctuations des tensions des supercondensateurs en fonction du temps, car ils ne se déchargent pas par moment.

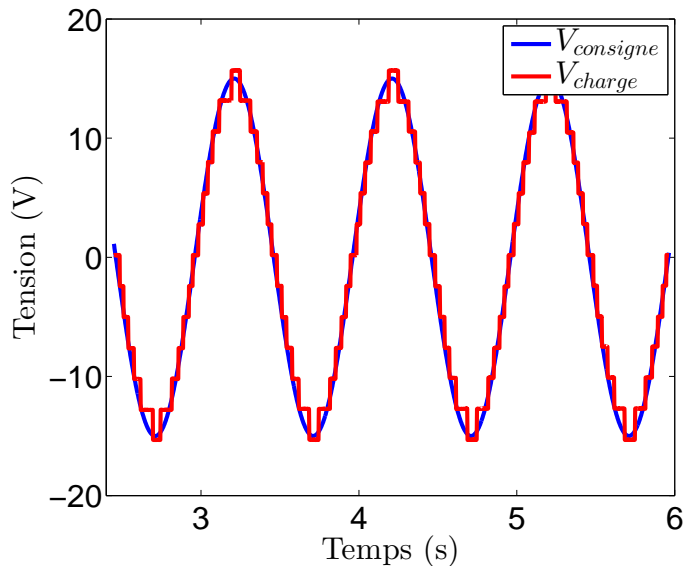


Figure 5.15 Tension de consigne et tension aux bornes de la charge pour une décharge sinusoïdale de 15 V peak à 1 Hz en fonction du temps.

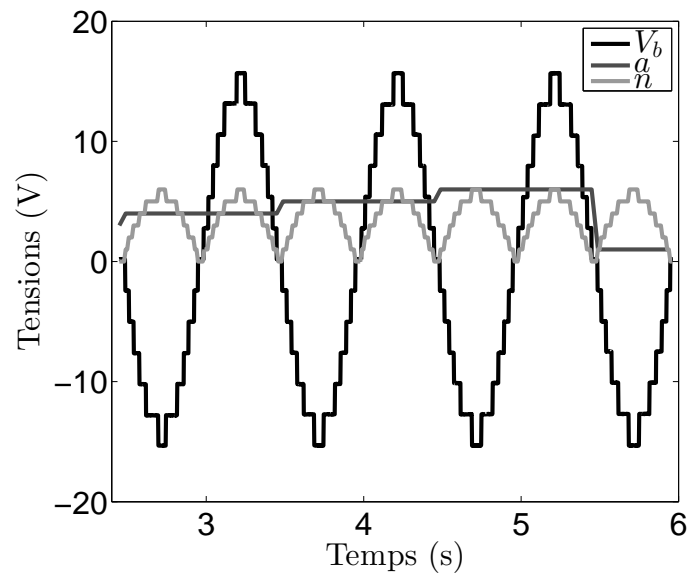


Figure 5.16 Tension de charge, numéro du premier supercondensateur mis en conduction, a , et nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , pour une décharge sinusoïdale 15 V à 1 Hz, en fonction du temps.

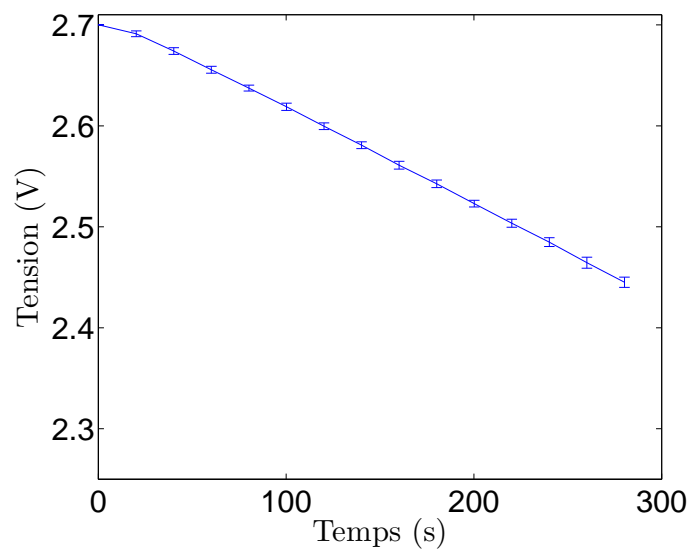


Figure 5.17 Tensions des supercondensateurs durant la décharge, pour une tension de consigne sinusoïdale de 15 V à 1 Hz, en fonction du temps.

5.4.3 Charge des supercondensateurs depuis une source de tension continue

Le tableau 5.4 résume les valeurs des composants.

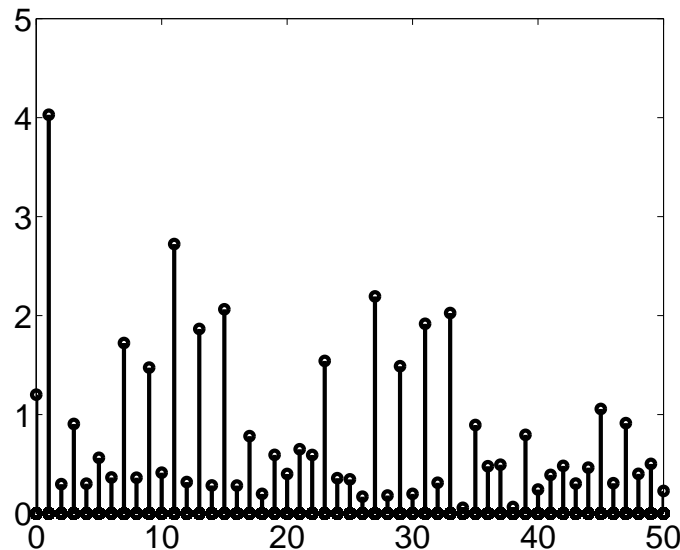


Figure 5.18 Différence entre la transformée de Fourier rapide de la tension de consigne et de la tension de charge durant la décharge, pour une tension de consigne sinusoïdale de 15 V à 1 Hz, en fonction du temps.

Tension de consigne, tension de charge et variables de commande

L'essai de charge des supercondensateurs à partir d'une source de tension CC est illustré à la Figure 5.19. La tension de la source, le courant de la branche ainsi que la tension de la branche y sont représentés. La différence de tension entre les supercondensateurs au début de la charge est visible : les sauts de tensions sur la tension de branche sont dus au changement du premier supercondensateur mis en conduction, a , et montre que la tension des supercondensateurs n'est pas égale au début de la simulation. Cela ne vient pas de l'algorithme. En effet, les cellules ne peuvent pas être commandées avant que leur tension ne dépasse 2 V et doivent être rechargés par une source de courant continu. Cela ne gêne cependant pas l'essai et n'a pas une influence significative sur le courant dans la branche. Les paramètres n et a sont illustrés à la Figure 5.20 avec le courant I_b de la branche.

Tensions des supercondensateurs en fonction du temps

La tension des supercondensateurs en fonction du temps est représentée à la Figure 5.21. Les supercondensateurs se chargent en même temps.

5.4.4 Charge des supercondensateurs depuis une tension alternative

Les tableaux 5.5 et 5.6 résument les valeurs des composants.

Tableau 5.4 Valeurs des paramètres lors de la recharge avec une source CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V_{initial}	2	V
V_s	10	V
R	2	Ω
I_{consigne}	3	A

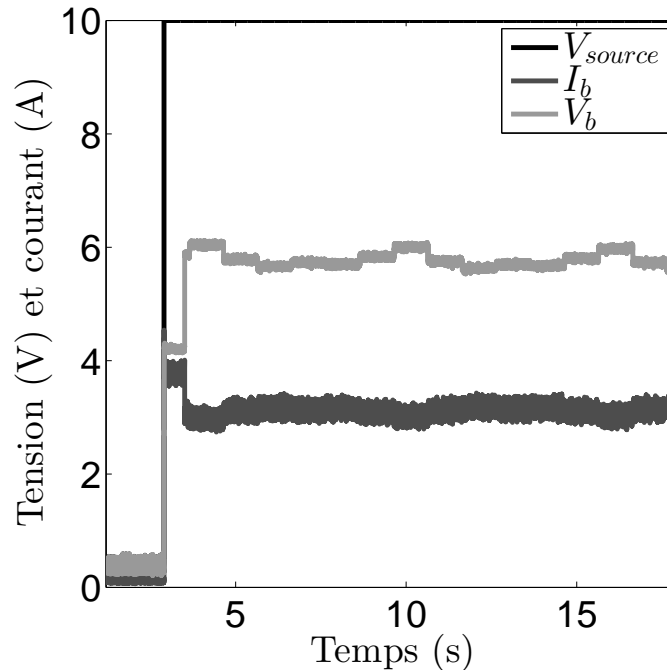


Figure 5.19 Tension de la source, courant dans la branche et tension de la branche pour une charge des supercondensateurs à partir d'une tension continue de 10 V, en fonction du temps.

Tension de consigne, tension à la charge et variables de commande

Lors de la charge à partir d'une source de tension alternative, il y a deux essais : à courant de branche continu ou alternatif. La Figure 5.22, présente les résultats des essais à courant continu, et la Figure 5.24, les résultats des essais à courant alternatif.

Pour le cas de la charge à courant continu, il est nécessaire de prendre en compte le nombre de supercondensateur mis en conduction, n , sur la Figure 5.23. En effet, le courant I_b circulant dans les supercondensateurs est bien compris entre 3.5 et 5 A. Lorsque la tension de la source V_s , devient trop faible pour avoir un courant positif supérieur au courant minimal, n est nul. Il en est de même avec la commande à courant alternatif, mais avec un courant minimum et maximum qui varient avec le temps. Cela est visible sur la Figure 5.25. Les essais ont été

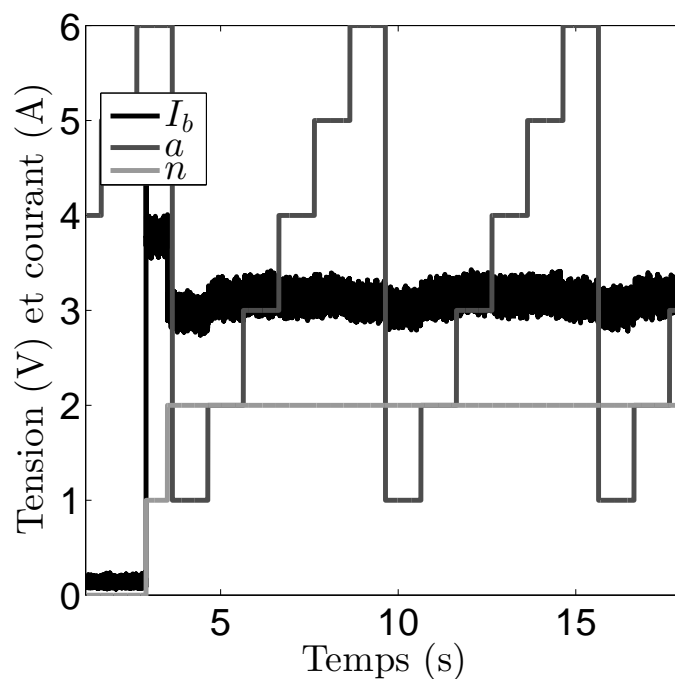


Figure 5.20 Courant dans la branche, numéro du premier supercondensateur mis en conduction, a , et nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , pour une charge à tension continue de 10 V, en fonction du temps.

réalisés avec une source de tension sinusoïdale redressée.

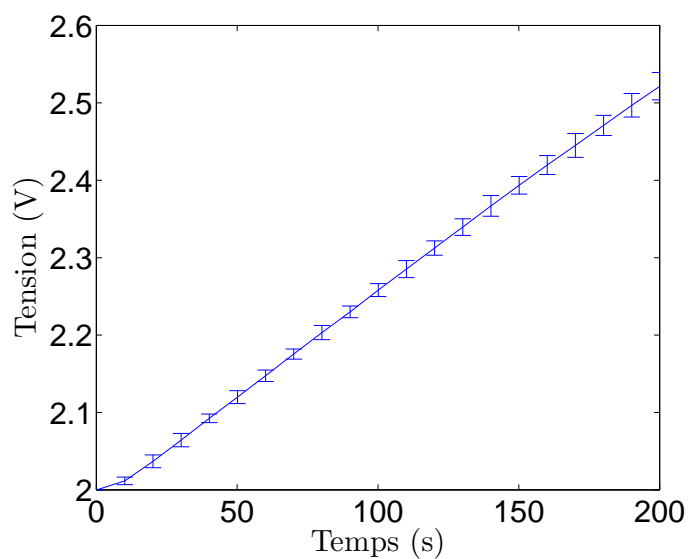


Figure 5.21 Tensions des supercondensateurs durant la charge, pour une charge à partir d'une source de tension de 10 V, en fonction du temps.

Tableau 5.5 Valeurs des paramètres lors de la recharge à partir d'une source CA avec un courant CA.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V_{initial}	2	V
V_s	15	V
f	0.1	Hz
R	2	Ω
I_{consigne}	3	A

Tableau 5.6 Valeurs des paramètres lors de la recharge à partir d'une source CA avec un courant CC.

Paramètre	Valeur	unité
N	6	-
V_{initial}	2	V
V_s	15	V
f	0.1	Hz
R	2	Ω
I_{consigne}	3	A

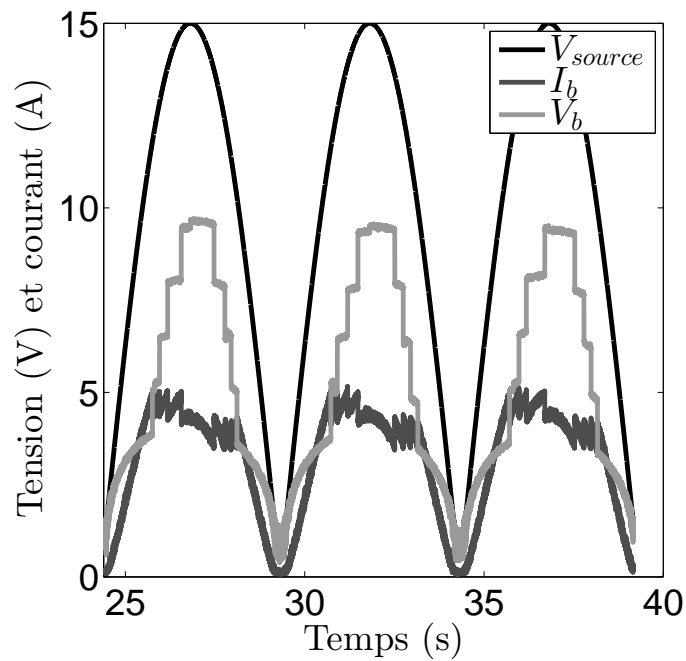


Figure 5.22 Tension de la source, courant dans la branche et tension de la branche pour une charge à partir d'une tension sinusoïdale redressée de 15 V à 0.1 Hz, pour une courant de branche continu, en fonction du temps.

Transformée Discrète de Fourier du courant dans la branche

Une Transformation de Fourier Rapide a été réalisée sur le courant de consigne et le courant dans la charge. La Figure 5.26 illustre la différence, en absolue, de ces deux transformations.

Tensions des supercondensateurs en fonction du temps

La tension des supercondensateurs en fonction du temps est représentée sur la Figure 5.27 pour un courant de branche continu, et sur la Figure 5.28, pour un courant alternatif. Les supercondensateurs se chargent en même temps. Il est possible de voir, avec les fluctuations de la tension des supercondensateurs en fonction du temps, car ils ne se chargent pas par moment.

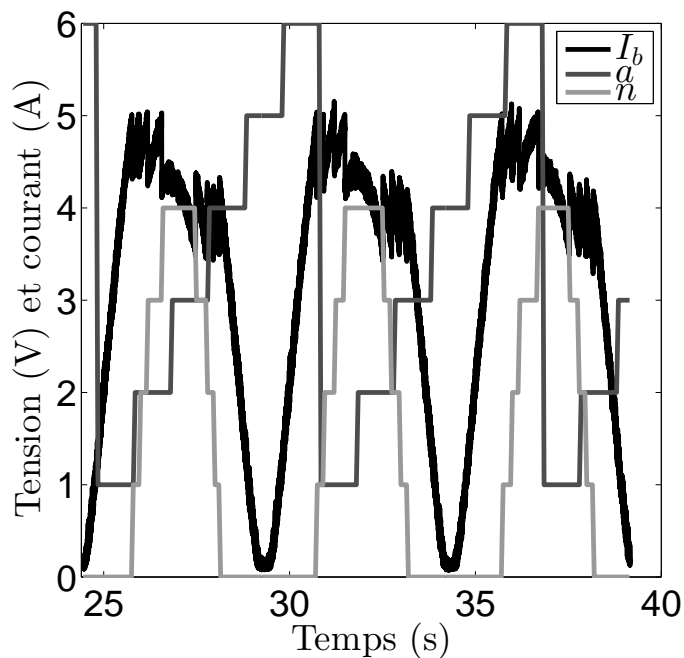


Figure 5.23 Courant dans la branche, numéro du premier supercondensateur mis en conduction, a , et nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , pour une charge à partir d'une tension sinusoïdale redressée de 15 V à 0.1 Hz, pour un courant de branche continu, en fonction du temps.

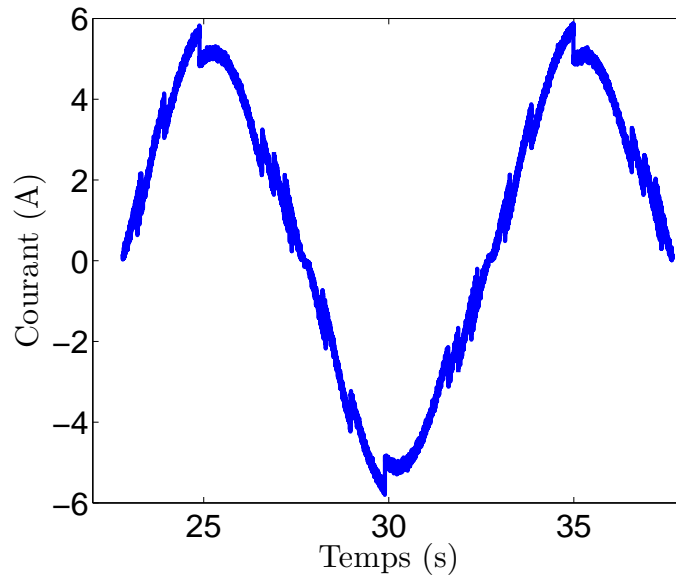


Figure 5.24 Courant de la source de tension pour une charge à partir d'une tension sinusoïdale de 15 V à 0.1 Hz, pour un courant de branche alternatif, en fonction du temps.

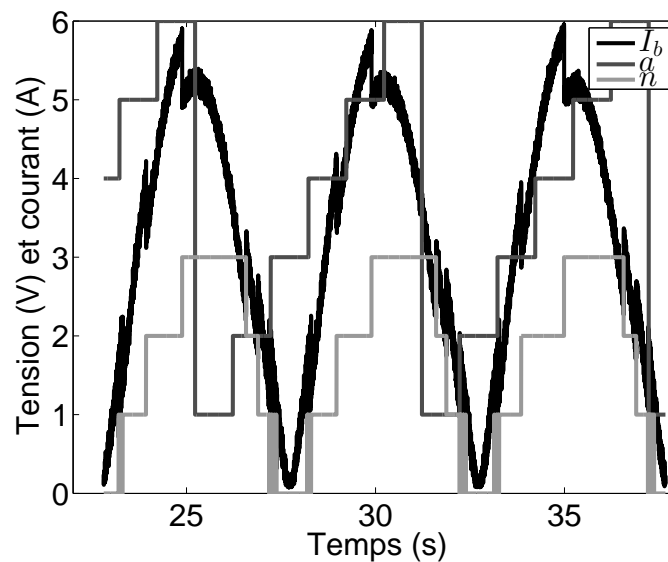


Figure 5.25 Courant dans la branche, numéro du premier supercondensateur mis en conduction, a , et nombre de supercondensateurs mis en conduction, n , pour une charge à partir d'une tension sinusoïdale redressée de 15 V à 0.1 Hz, pour un courant de branche alternatif, en fonction du temps.

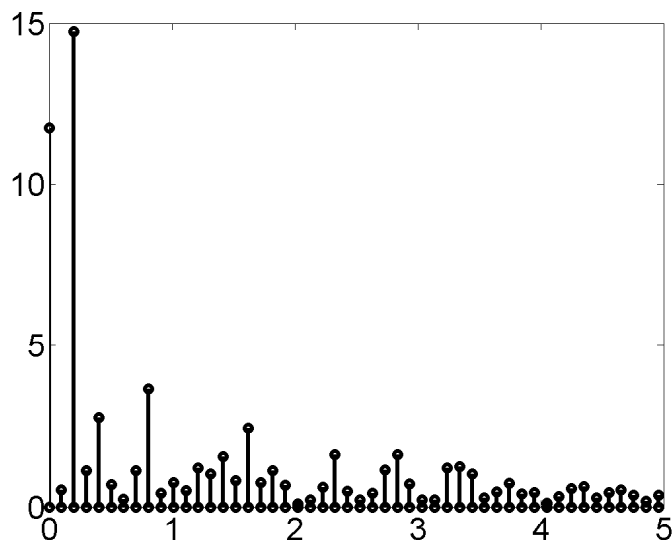


Figure 5.26 Différence entre la transformée de Fourier rapide du courant de consigne et du courant de la branche durant la charge, pour une tension de source sinusoïdale de 15 V à 0.1 Hz, pour un courant de branche alternatif, en fonction du temps.

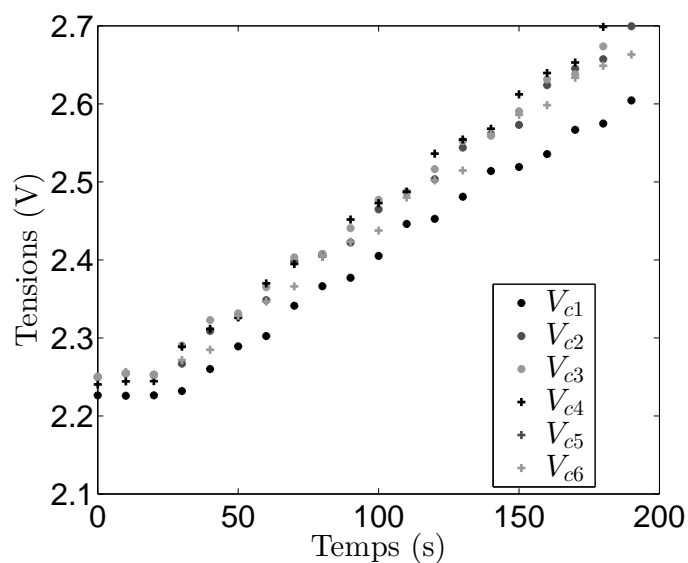


Figure 5.27 Tensions des supercondensateurs durant la charge, pour une tension de source sinusoïdale redressée de 15 V à 0.1 Hz, pour un courant de branche continu, en fonction du temps.

5.5 Résumé

Dans ce chapitre sont montrés les résultats expérimentaux des algorithmes de charge et décharge des cellules SUPERCAPS pour un système comportant un total de 6 superconden-

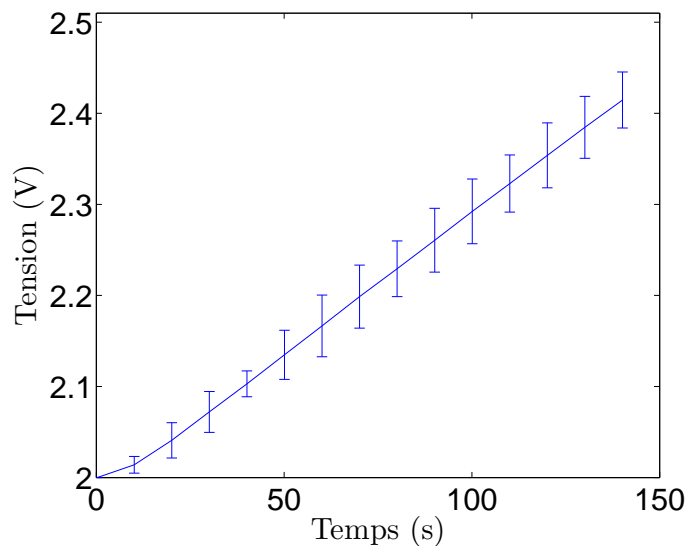


Figure 5.28 Tensions des supercondensateurs durant la charge, pour une tension de source sinusoïdale redressée de 15 V à 0.1 Hz, pour un courant de branche alternatif, en fonction du temps.

sateurs de 350 F. La tension de la branche V_b , le courant circulant dans la branche I_b ainsi que les variables internes à l'algorithme, tels que l'indice du premier supercondensateur mis en conduction (a) et le nombre de supercondensateurs mis en conduction n , sont montrés au cours du temps de l'expérience, pour des essais de charge de supercondensateurs depuis une source de tension continue de 10 V, une source de tension sinusoïdale de 15 V à 0.1 Hz, et des essais d'alimentation d'une charge résistive à 10 V en continu à 15 V_{peak} en alternatif à 1 Hz. La tension des supercondensateurs en fonction du temps est explicité et répond aux contraintes fixées dans ce projet. Une analyse fréquentielle est aussi faite pour les signaux alternatifs.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse des travaux

Dans le cadre de ce mémoire, les supercondensateurs ainsi que différents systèmes qui permettent d'égaliser la tension ont été abordés dans la revue de littérature. Cela a permis de connaître les problématiques et les atouts de chacun. Les convertisseurs multiniveaux et la preuve de concept de SUPERCAPS ont été introduits.

La modélisation des cellules de SUPERCAPS a permis de simuler leur comportement et a permis d'élaborer des algorithmes qui permettent de recharger une branche de cellules SUPERCAPS à partir d'une source de tension continue ou alternative à différentes fréquences, et d'alimenter un système avec une tension continue ou alternative à des fréquences différentes. Deux types de cellules ont été simulées : une cellule comprenant des supercondensateurs de 3400 F et de faibles résistances de transistors $R_{DS(on)}$, et une cellule comprenant des supercondensateurs de 350 F avec des résistances $R_{DS(on)}$ plus élevées. Ces dernières étant présentes au laboratoire, les simulations ont pu être vérifiées expérimentalement.

Les résultats expérimentaux des cellules de 350 F concordent avec les simulations. La branche comprenant 6 supercondensateurs de 350 F, a été testée lors d'un stockage d'énergie depuis une source de tension continue de 10 V, puis une source de tension alternative de 15 V à 0.1 Hz, pour des consignes de courant différentes. Puis la branche a servi à alimenter une charge résistive à 10 V continu puis à 15 V à 1 Hz. La consigne a été respectée en égalisant la tension des supercondensateurs présents dans la branche. Expérimentalement, les courants ont été volontairement faibles, de l'ordre de l'ampère, afin de d'obtenir une durée d'expérience plus longue.

6.2 Limitations de la solution proposée et améliorations futures

Les résultats des simulations des cellules de 3400 F devront être vérifiées expérimentalement. Les filtres n'ont pas été abordés dans ce mémoire mais il existe plusieurs possibilités à envisager. L'étude d'une branche SUPERCAPS en parallèle avec une autre source de tension n'a pas non plus été abordée. SUPERCAPS fournirait à un système la puissance que l'autre source de tension ne pourrait fournir. Il sera aussi possible de fusionner les fichiers de simulation sur Hypersim afin d'avoir les algorithmes de charge et de décharge de la branche dans un même fichier. Enfin, une valeur importante de l'inductance en série avec la branche de supercondensateur n'a pas été testée.

RÉFÉRENCES

- P. Barrade, “Series connection of supercapacitors : Comparative study of solutions for the active equalization of the voltages”, dans *Proceedings of 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems*, 2002, p. 4.
- A. Burke, “Ultracapacitors : why, how, and where is the technology”, *Journal of power sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37–50, 2000.
- Y. Diab, P. Venet, et G. Rojat, “Comparison of the different circuits used for balancing the voltage of supercapacitors : Studying performance and lifetime of supercapacitors”, dans *Esscap*, 2006, pp. on-CD.
- T. Dietrich, “Ultracaps-a new energy storage device for peak power applications”, dans *The 18 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, 2001.
- I. S. Ike, I. Sigalas, S. Iyuke, K. I. Ozoemena *et al.*, “An overview of mathematical modeling of electrochemical supercapacitors/ultracapacitors”, *J. Power Sources*, vol. 273, no. 1, pp. 264–277, 2015.
- K. Ilves, A. Antonopoulos, S. Norrga, et H.-P. Nee, “A new modulation method for the modular multilevel converter allowing fundamental switching frequency”, *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 27, no. 8, pp. 3482–3494, 2012.
- T. Kovaltchouk, B. Multon, H. B. Ahmed, J. Aubry, et P. Venet, “Enhanced aging model for supercapacitors taking into account power cycling : Application to the sizing of an energy storage system in a direct wave energy converter”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2405–2414, 2015.
- J.-S. Lai et F. Z. Peng, “Multilevel converters-a new breed of power converters”, *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 32, no. 3, pp. 509–517, 1996.
- D. Linzen, S. Buller, E. Karden, et R. W. De Doncker, “Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems”, *IEEE transactions on industry applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1135–1141, 2005.
- R. Lu, C. Zhu, L. Tian, et Q. Wang, “Super-capacitor stacks management system with dynamic equalization techniques”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 1, pp. 254–258, 2007.

- A. Manenti, A. Abba, A. Merati, S. M. Savaresi, et A. Geraci, “A new bms architecture based on cell redundancy”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4314–4322, 2011.
- M. M. Merlin et T. C. Green, “Cell capacitor sizing in multilevel converters : cases of the modular multilevel converter and alternate arm converter”, *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 350–360, 2014.
- M. M. Merlin, T. C. Green, P. D. Mitcheson, D. R. Trainer, R. Critchley, W. Crookes, et F. Hassan, “The alternate arm converter : A new hybrid multilevel converter with dc-fault blocking capability”, *IEEE transactions on power delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 310–317, 2014.
- J.-N. Morin, “Preuve de concept d’un dispositif de stockage d’énergie pour applications dans des convertisseurs de puissance”, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 2013.
- P. Münch, D. Görges, M. Izák, et S. Liu, “Integrated current control, energy control and energy balancing of modular multilevel converters”, dans *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2010, pp. 150–155.
- N. Rizoug, P. Bartholomeus, et P. Le Moigne, “Modeling and characterizing supercapacitors using an online method”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3980–3990, 2010.
- L. Tolbert, F. Z. Peng, T. Cunyngham, et J. N. Chiasson, “Charge balance control schemes for cascade multilevel converter in hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 5, pp. 1058–1064, 2002.
- Q. Tu, Z. Xu, et L. Xu, “Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters”, *IEEE transactions on power delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 2009–2017, 2011.
- M. Winter et R. J. Brodd, “What are batteries, fuel cells, and supercapacitors ?” 2004.
- L. Zubietta et R. Bonert, “Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications”, *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, 2000.